



Editora  
Bernoulli



# FÍSICA

Volume 05





**FÍSICA**

**Volume 05**

# Frente A

**09 3** Dinâmica do  
movimento circular  
Autor: Francisco  
Pazzini Couto

**10 11** Trabalho,  
potência e rendimento  
Autor: Francisco  
Pazzini Couto

# Frente B

**09 21** Leis de Kepler  
Autor: Luiz Machado

**10 29** Lei da  
Gravitação Universal  
Autor: Luiz Machado

# Frente C

09 41 Reflexão,  
refração e difração  
Autor: Lívio Ribeiro  
Canto

10 51 Interferência  
de ondas Autor: Lívio  
Ribeiro Canto

## Sumário - Física Frente D 13

59 Cargas em movimento em campo  
magnético Autores: Luiz Machado Lívio  
Ribeiro Canto

14 69 Força  
magnética sobre fios  
Autores: Luiz Machado

Lívio Ribeiro Canto

15 81 Indução  
eletromagnética e  
transformadores  
Autores: Luiz Machado

Lívio Ribeiro Canto



# FÍSICA MÓDULO FRENTE

## Dinâmica do movimento 09 A circular

O estudo das aplicações das Leis de Newton nos  
conduz **Força resultante centrípeta**

a situações em que os objetos descrevem trajetórias  
curvilíneas. No entanto, quando estudamos as  
aplicações A figura a seguir mostra uma partícula de  
massa  $m$

das Leis de Newton, não analisamos as situações em  
que descrevendo uma curva de raio  $R$  com velocidade  
 $v$ .

tais movimentos ocorrem, como a de satélites  
orbitando  $v$

planetas, de um carro efetuando uma curva, de um  
pêndulo  $m$  oscilando e de outras mais. Neste módulo,  
analisaremos  $v$  tais situações e aprenderemos um  
importante conceito,

o de força resultante centrípeta. Veremos que, em  
algumas  $a_c$

situações, as Leis de Newton parecem não funcionar,  $F_m$

situações essas em que os movimentos são analisados a partir de referenciais não inerciais.  $F_{RC}$

Como podemos observar, o vetor  $v$  muda de direção ao

**FORÇA RESULTANTE** longo do movimento da partícula. O ritmo no qual essa

mudança ocorre é medido pelo vetor aceleração; no caso

Discutimos, em módulos anteriores, que o agente analisado, o vetor aceleração centrípeta.

responsável pela mudança no vetor velocidade é a força, Utilizando a 2ª Lei de Newton para a situação descrita,

seja ela de qualquer natureza: peso, tensão, força normal, temos que:

força de atrito, força elétrica, etc. Considere a figura a  $F = m \cdot a$  (expressão geral da 2ª Lei) seguir, na qual uma partícula de massa  $m$  descreve uma  $F = m \cdot a$  (expressão particular da 2ª Lei) trajetória curvilínea com velocidade  $v$ , sujeita a uma força  $F_{RC}$

resultante  $F_R$ . Sabemos que o módulo da aceleração centrípeta é dado

$v$  por  $a = v^2/R$ , em que  $v$  é o módulo da velocidade da partícula,  $c$

e  $R$  é o raio da curva descrita pela partícula. Utilizando esse

o resultado na expressão da 2ª Lei de Newton, temos:

$$F_R$$



A força resultante  $F_{v2} = m \cdot a \Rightarrow F = m \cdot R \cdot C \cdot R \cdot F$  pode ser decomposta em duas  $R$

componentes ortogonais, uma na direção paralela à  
OBSERVAÇÕES

velocidade, força resultante tangencial ( $F_t$ ), e a outra  $R$

1. A expressão anterior nos mostra que o módulo de  $F$  na direção perpendicular à velocidade, força

resultante  $R_C$  é inversamente proporcional ao valor do raio  $R$  da centrípeta ( $F_c$ ).  $R_C$  curva, quando  $m$  e  $v$  forem constantes. Isso significa

$F_v$  que, quando uma curva apresentar raio pequeno,

$m \cdot R \cdot T$  o valor da força resultante centrípeta deve ser

$F$  grande. Caso o valor de  $R$  seja reduzido três vezes,

$F_R$  e  $m$  e  $v$  permaneçam constantes, o valor de  $F_{RCRC}$  deve

aumentar três vezes.

## 2. O módulo da $F$ é proporcional ao quadrado do módulo $v$

Como já sabemos, a componente tangencial da força da velocidade  $v$  do corpo, quando o raio de curvatura

resultante altera o módulo do vetor velocidade, isto é, caso  $R$  e a massa  $m$  do corpo forem constantes. Isso

a força  $F$  esteja no mesmo sentido do vetor velocidade,  $F_T$  significa que, se a força resultante centrípeta que atua

o módulo deste aumenta, e, caso apresente o sentido oposto sobre um corpo que descreve uma curva de raio  $R$

ao do vetor velocidade, o módulo desse vetor diminui. com velocidade  $v$  for  $F$ , então, para manter o corpo  $R$  A seguir, estudaremos com mais detalhes a componente na curva, quando este possui uma velocidade  $2v$ ,

centrípeta da força resultante. será necessária uma força de módulo igual a  $4F$ .  $R$

Editora Bernoulli 3

## Frente A Módulo 09

3. A força resultante centrípeta ( $F$ ) é uma resultante À medida que o módulo da velocidade do carro

aumenta, <sub>RC</sub>

de forças; portanto, não tem sentido abordar alguns o módulo da força de atrito estático também aumenta,

aspectos comuns às forças no sentido convencional. até atingir um valor limite. Desse instante em diante,

Não existe par de ação e reação para resultantes de o carro derrapa e o motorista pode perder o controle do

forças, mas sim para cada força em separado. automóvel. Por essa razão, um motorista não pode aumentar

4. Os vetores indefinidamente o valor da velocidade com que o carro  $v$  e  $F$  são perpendiculares, pois a força <sub>RC</sub> realiza a curva. resultante centrípeta altera a direção do vetor

velocidade, mas não o módulo deste.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

### ANÁLISE DE SITUAÇÕES

**01.** Sabemos que um carro, ao realizar uma curva em alta

**Sistema Terra-Lua** velocidade, pode derrapar e causar um acidente. Quando

ocorre derrapagem, existe um movimento lateral do pneu

O sistema Terra-Lua é representado na figura a seguir. na pista, indicando que a força de atrito estático máximo

Para um observador na Terra, a Lua gira ao redor do entre o pneu e o piso não é suficiente para manter o carro

nosso planeta, descrevendo, com boa aproximação, um na curva. Considere um carro em uma pista circular de

movimento circular uniforme. Lembre-se de que o módulo raio  $R$ , contida em um plano horizontal. O coeficiente de

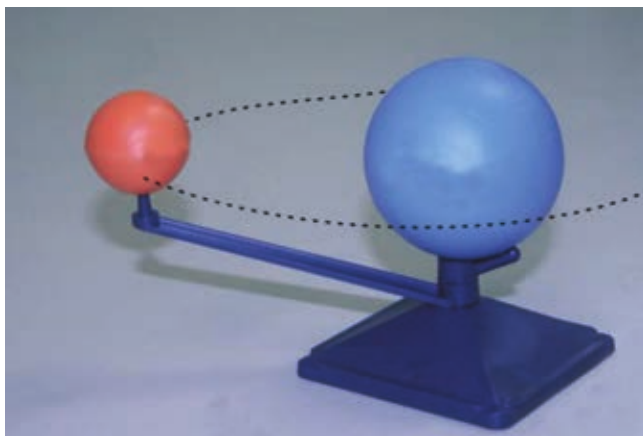
da força de atração da Terra sobre a Lua é igual ao módulo atrito estático entre os pneus e o asfalto tem valor igual

da força de atração da Lua sobre a Terra, pois essas forças a  $\mu$ . Despreze os efeitos da resistência do ar e considere formam um par de ação e reação. Observe que a força o valor da aceleração devido à gravidade igual a  $g$ .

resultante centrípeta que atua sobre a Lua é a força de atração gravitacional exercida pela Terra. É essa força que MCU N “obriga” a Lua a mudar continuamente a direção de seu vetor

velocidade, cujo módulo permanece praticamente constante.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{R\text{CGravitacional}} + \mathbf{F}_{at}$$



Terra

Lua

$$F_{\text{Lua-Terra}} \quad F_{\text{Lua-Terra}}$$

P

Determinar o módulo da velocidade máxima com que o carro pode efetuar a curva sem que ocorra a derrapagem.

**Resolução**

**Carro em uma curva** são a força peso Na direção vertical, as forças que atuam sobre o carro P e a força de reação normal N. Essas

forças se equilibram; logo,  $P = N$ .

Quando um carro realiza uma curva, surge entre os pneus

do carro e a pista uma força de atrito estático, na





Observe que o módulo da velocidade máxima com que o carro pode realizar a curva não depende da massa do

carro, e sim do raio da curva, do coeficiente de atrito entre

$F = F_{R \text{ Cat}}$  o pneu e a pista e da aceleração da gravidade.

## 4 Coleção Estudo

### Dinâmica do movimento circular

**Carrinho efetuando um loop** A força resultante centrípeta ( $F_c$ ), ou simplesmente força  $F_{R \text{ C}}$  centrípeta, não obedece à 3ª Lei de Newton, uma vez que Os emocionantes passeios em uma montanha-russa muito não é uma força gerada pela interação entre dois corpos. devem à força centrípeta. O mesmo ocorre nos circos, com A força centrípeta é uma resultante de forças que apresenta o popular número do Globo da Morte. Essa apresentação uma direção particular, perpendicular à velocidade. consiste em um determinado número de motocicletas – Portanto, seria errado dizer que no exercício resolvido usualmente duas – movendo-se dentro de um globo de anterior em que um carro percorre uma trajetória curva, metal com cerca de 4 m de raio. As motos movem-se em atuam sobre o carro a força peso, a força normal, círculos efetuando voltas de 360° e ficando de “ponta

a a força de atrito estático e a força resultante centrípeta. cabeça”. Alguns brinquedos reproduzem essa situação ao Nesse caso, a força de atrito é a força resultante centrípeta. realizarem trajetórias em *loop*, como as representadas a

seguir. Para que o carrinho possa fazer o *loop*, é necessário que ele possua uma certa velocidade mínima.

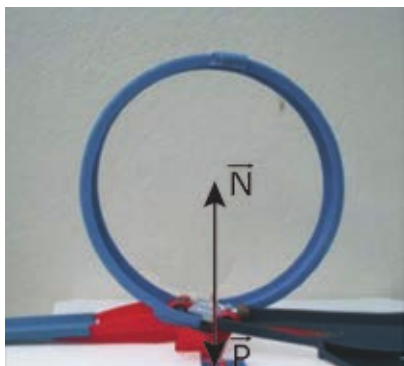
Nas figuras a seguir, representamos as forças peso  $P$  e

## EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

normal  $N$  que atuam sobre o carrinho, em 4 pontos distintos de sua trajetória, A, B, C e D. Despreze as forças de atrito **02.** Um carrinho desliza em um trilho com velocidade de

centrípeta atuando sobre o carrinho, embora cada situação pertence a um plano vertical. O ponto A situa-se em um trecho horizontal, e os pontos B e C, em curvas de raios possa ter uma representação diferente. nessa situação. Observe que há sempre uma força resultante módulo constante, no sentido indicado pela seta. O trilho

iguais. Sejam  $N_A$ ,  $N_B$  e  $N_C$  os módulos da força normal nos pontos A, B e C, respectivamente. Colocar em ordem



crescente os módulos dessas forças.

B

A

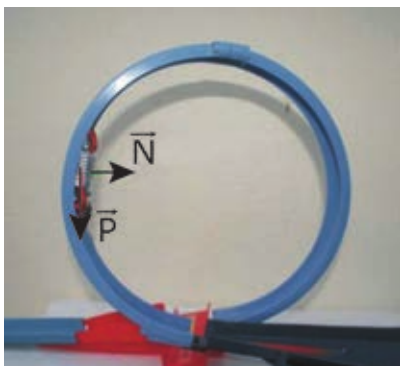
C

***Resolução***

No trecho horizontal do circuito, as forças que atuam sobre o carrinho são a força normal e a força peso, de

No ponto A:  $F = N - P_{RC}$  módulos iguais, uma vez que o carrinho está em equilíbrio **na** direção vertical. Logo,  $P = N$

FÍSICA . A



No ponto B, a resultante das forças verticais que atuam sobre o carrinho deve estar direcionada para o centro da curva, isto é, para baixo. Logo, o módulo da força peso no ponto B deve ser maior que o módulo da força normal nesse mesmo ponto, pois a força centrípeta que atua sobre o carrinho, no ponto B, é dada por  $F_R = P - N_{CBB}$ . Logo,  $P > N_B$ .  
No ponto C, a resultante das forças verticais que atuam

**No ponto B:**  $F$  sobre o carrinho deve estar direcionada para o centro da =  $N_{RC}$  curva, isto é, para cima. Logo, o módulo da força peso no



ponto C deve ser menor que o módulo da força normal nesse mesmo ponto, pois a força centrípeta que atua

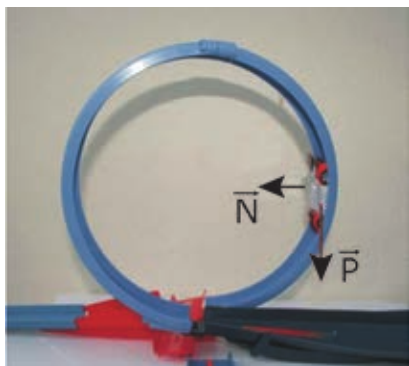
sobre  
o  
carrinho,  
no  
ponto  
C,  
é  
dada  
por  
 $F_R$   
=  
N  
-  
P.  
Logo,  
P  
<  
N<sub>C</sub>.

Sendo o peso do carrinho constante, temos que  $N < N < N$  . B A C

**03.** Uma atração muito popular nos circos é o Globo da Morte, que consiste numa gaiola de forma esférica no

No ponto C:  $F = N + P_R$  interior da qual se movimenta uma pessoa pilotando uma

c motocicleta. Considere um globo de raio  $R = 3,6 \text{ m}$ .





No ponto D:  $F = N_{RCA}$

Editora Bernoulli 5

## Frente A Módulo 09

A) Fazer um diagrama das forças que atuam sobre a

**02.** (UFMG) Daniel está brincando com um carrinho, que corre

motocicleta nos pontos A, B, C e D, indicados na por uma pista composta de dois trechos retilíneos – P e

figura. Para efeitos práticos, considerar o conjunto R – e dois trechos em forma de semicírculos – Q e S –,

piloto + motocicleta como um ponto material. como representado nesta figura: Desprezar as forças de atrito.

P

B) Determinar o módulo da velocidade mínima que o

conjunto piloto + motocicleta deve ter no ponto C

para não perder o contato com o interior do globo.

**Resolução:**

A)

N C R

N O carrinho passa pelos trechos P e Q, mantendo o módulo P

D B N

de sua velocidade constante. Em seguida, ele passa pelos

P trechos R e S, aumentando sua velocidade. Com base P

N A nessas informações, é **CORRETO** afirmar que a resultante

P das forças sobre o carrinho = força peso

N P A) é nula no trecho Q e não é nula no trecho R.

= força normal B) é nula no trecho P e não é nula no trecho Q.

B) No ponto mais alto da trajetória da motocicleta, ponto C, C) é nula nos trechos P e Q.

a força centrípeta é dada pela soma da força peso e D) não é nula em nenhum dos trechos marcados.

da força normal, isto é,  $F = P + N$ . **R C 03.**

(UFMG) Quando um carro se desloca numa estrada Se desejamos determinar o módulo da velocidade horizontal, seu peso P é anulado pela reação normal N mínima com a qual o conjunto piloto + motocicleta exercida pela estrada. Quando esse carro passa no alto realiza o *loop*, devemos observar que, nessa de uma lombada, sem perder o contato com a pista, como velocidade limite, o valor da força normal é mostra a figura, seu peso será representado por P', e a praticamente zero, isto é,  $N = 0$ . Desse modo, o valor reação normal da pista sobre ele, por N'. da força resultante centrípeta será dado por  $F = P$ . **R C**  
Desenvolvendo a expressão, temos:

$$F_{mv2} - gR = P \Rightarrow = mg \Rightarrow v =$$

R C R Lombada

$\Rightarrow v = 10 \sqrt{3} \text{ m/s} = 6,0 \text{ m/s}$  Com relação aos módulos dessas forças, pode-se

afirmar  
que

A)  $P' < P$  e  $N' = N$ . D)  $P' = P$  e  $N' > N$ .

## EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

N. E)  $P' > P$  e  $N' < N$ . C)  $P' = P$  e  $N' < N$ .

**01.** (VUNESP) Uma partícula de massa  $m$  descreve uma **04.**

(Cesgranrio) Em uma das missões científicas do Programa trajetória circular com movimento uniforme, no sentido Apolo, os astronautas determinaram o período de horário, como mostra a figura. oscilação de um pêndulo simples na superfície da Lua. Qual dos seguintes conjuntos de vetores **MELHOR** As figuras das alternativas a seguir reproduzem a representa a força resultante  $F$  atuando na partícula, oscilação desse pêndulo desde um dos pontos mais altos a velocidade  $v$  e a aceleração  $a$  da partícula, no ponto  $P$  de sua trajetória ( $M$ ) até um outro ponto ( $N$ ). Em qual das indicado na figura? alternativas a seguir está **CORRETAMENTE** representada

a resultante  $R$  de todas as forças que atuam sobre a massa

do pêndulo simples quando esta passa pelo ponto  $N$ ?

$P$

A) D)

A) C) F E) M F M R N N

a R



$$a = 0$$

$$F_v a v v$$

$$B) N N M R M$$

$$D) F$$

$$a R = 0 C)$$

$$F_v R M N a = 0 v$$

## 6 Coleção Estudo

# Dinâmica do movimento circular

**05.** (PUC-SP-2010) Um automóvel de massa 800 kg, dirigido Força centrípeta A) C)

por um motorista de massa igual a 60 kg, passa pela

parte mais baixa de uma depressão de raio = 20 m

com velocidade escalar de 72 km/h. Nesse momento, locidade locidade

a intensidade da força de reação que a pista aplica no Ve Ve Força centrípeta

veículo é B) Ve D) Força centrípeta locidade Ve r = 20 mlocidade

Força centrípeta

**04.** (PUC Rio) O trem rápido francês, conhecido como TGV

Adote  $g = 10 \text{ m/s}^2$  (*Train à Grande Vitesse*), viaja de Paris para o sul com uma

velocidade média de cruzeiro  $v = 216 \text{ km/h}$ . A aceleração

A)  $231 \text{ 512 N}$ . C)  $1 \text{ 800 N}$ . E)  $24 \text{ 000 N}$ .

experimentada pelos passageiros, por razões de conforto e

B)  $215 \text{ 360 N}$ . D)  $25 \text{ 800 N}$ . segurança, está limitada a  $0,05 g$ . Qual é, então, o menor

raio que uma curva pode ter nesta ferrovia? ( $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

A)  $7,2 \text{ km}$  B)  $93 \text{ km}$

**01.** (PUC Minas–2009) Um objeto percorre uma circunferência D)  $9,3 \text{ km}$  C)  $72 \text{ km}$

esse objeto E) Não existe raio mínimo. em movimento circular uniforme. A força resultante sobre

A) é nula, porque não há aceleração. **05.** (UFRGS) Do ponto de vista de um certo observador

B) é dirigida para o centro. inercial, um corpo executa movimento circular uniforme

C) é tangente à velocidade do objeto. sob a ação exclusiva de duas forças.

D) tem sentido contrário ao da velocidade. Analise as seguintes afirmações a respeito dessa situação:

I. Uma dessas forças necessariamente é centrípeta.

**02.** (UFMG) Durante uma apresentação da Esquadrilha da II. Pode

acontecer que nenhuma dessas forças seja **FÍSICA**

Fumaça, um dos aviões descreve a trajetória circular centrípeta.

representada nesta figura:

III. A resultante dessas forças é centrípeta.

Quais estão **CORRETAS**?

A)  
Apenas  
I

B)  
Apenas  
II

C) Apenas III

D) Apenas I e III

E) Apenas II e III

**06.** (FGV-SP) Um automóvel de 1 720 kg entra em uma curva

de raio  $r = 200$  m, a 108 km/h. Sabendo que o coeficiente

Ao passar pelo ponto mais baixo da trajetória, a força que de atrito entre os pneus do automóvel e a rodovia é igual

o assento do avião exerce sobre o piloto é a 0,3, considere as afirmações:

A) igual ao peso do piloto. I. O automóvel está a uma velocidade segura para fazer

B) maior que o peso do piloto. a curva.

C) menor que o peso do piloto. II. O automóvel irá derrapar radialmente para fora da

curva.

D) nula.

III. A força centrípeta do automóvel excede a força de

**03.** atrito. (PUC Minas–2010) O diagrama mostra um objeto

movendo-se no sentido anti-horário, em uma trajetória IV. A força de atrito é o produto da força normal do

circular horizontal. Assinale o diagrama que automóvel e o coeficiente de atrito. **MELHOR**

representa a direção e o sentido da velocidade do objeto Baseado nas afirmações anteriores, responda:

e a direção e o sentido da força centrípeta sobre ele.

A) Apenas I está correta.

B) As afirmativas I e IV estão corretas.

C) Apenas II e III estão corretas.

Objeto

D) Estão corretas I, III e IV.

E) Estão corretas II, III e IV.

Editora Bernoulli **7**

## Frente A Módulo 09

**07.** (UFMG) Observe a figura. **09.** (ITA-SP) Para que um automóvel percorra uma curva

horizontal de raio dado, numa estrada horizontal, com

III uma certa velocidade, o coeficiente de atrito estático entre

os pneus e a pista deve ter no mínimo um certo valor  $\mu$

II (figura A). Para que o automóvel percorra uma curva 3 horizontal, com o mesmo raio e com a mesma velocidade

I 2 anterior, numa estrada com sobrelevação (figura B), sem ter tendência a derrapar, o ângulo de sobrelevação deve ter o valor  $\alpha$ . Podemos afirmar que

1

Essa figura representa três bolas, I, II e III, que estão presas entre si por cordas de 1,0 m de comprimento cada uma. As bolas giram com movimento circular uniforme,  $\alpha$



sobre um plano horizontal sem atrito, mantendo as cordas B A



esticadas. A massa de cada bola é igual a 0,5 kg, e a



velocidade da bola III é de 9,0 m/s. A)  $\tan \alpha = \mu$ .



A relação entre as tensões nas cordas 1, 2 e 3, B)  $\tan \alpha = gR$ .



representadas por  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ , respectivamente, é  $F_1 = F_2 = F_3$  C)  $\tan \alpha = \mu_2$ .



A)  $F_1 > F_2 > F_3$  . D)  $\sin \alpha = \mu_2$  .

B)  $F_1 = F_2 = F_3$  E)  $\cos \alpha = gR$  .

C)  $F_3 < F_2 < F_1$ . **10.** (Mackenzie-SP) O eixo de um trecho de rodovia está

D)  $F = F$  e  $F > F_{3231}$  contido num plano vertical e apresenta-se em perfil,

E)  $F$  conforme indica a figura. O raio de curvatura dos pontos =  $F$  e  $F > F_{2123}$

A e B são iguais, e o trecho que contém o ponto C

**08.** (Cesgranrio) Uma esfera de aço (figura a seguir) suspensa é horizontal. Um automóvel percorre a rodovia com

por um fio descreve uma trajetória circular de centro O velocidade escalar constante. Sendo  $N_A$ ,  $N_B$  e  $N_C$  a reação

em um plano horizontal no laboratório. normal da rodovia sobre o carro nos pontos A, B e C,

respectivamente, podemos dizer que

A

C

B

A)

$N_A$

$>$

$N_B$

$>$

$N_C$ .

$N_{BA}$   
C

T B)  $N_B > N_C > N_A$ . C)  $N_C > N_B > N_A$ .

D)

$N_A$

As forças exercidas sobre a esfera (desprezando-se E)  $N_A = N_C = N_B$ .

a resistência do ar) são:

A) **11.** (PUC-SP) *Que graça pode haver em ficar dando voltas na*

*Terra uma, duas, três, quatro... 3 000 vezes? Foi isso que a americana Shannon Lucid, de 53 anos, fez nos últimos seis meses a bordo da estação orbital russa Mir [...]*

B)

VEJA, 2 out. 1996.

Em órbita circular, aproximadamente 400 km acima da superfície, a Mir move-se com velocidade escalar constante

C)

de aproximadamente 28 080 km/h, equivalente a  $7,8 \times 10^3$  m/s. Utilizando-se o raio da Terra como  $6 \times 10^3$  km, qual é, aproximadamente, o valor da

D) aceleração da gravidade nessa órbita?

A)  
Zero

B)  
1,0  
m/  
s<sup>2</sup>

E) C)  $7,2 \text{ m/s}^2$

D)  
9,5  
m/  
s<sup>2</sup>

E)  
11,0  
m/  
s<sup>2</sup>

## 8 Coleção Estudo

# Dinâmica do movimento circular

**12.** (ITA-SP) Seja  $F$  a resultante das forças aplicadas a uma **14.**  
(UFV-MG-2008) Uma roda gigante gira com velocidade

partícula de massa  $m$ , velocidade  $v$  e aceleração  $a$ . Se a angular  $\omega$  constante, levando três meninos A, B e C, que,

partícula descrever uma trajetória plana, indicada pela em um determinado instante, encontram-se nas posições

curva tracejada em cada um dos esquemas a seguir, ilustradas na figura a seguir.

segue-se que aquele que relaciona **CORRETAMENTE** os

A



vetores coplanares  $v$ ,  $a$  e  $F$  é

A)  $\omega v$





F B C



B) a v

F Assinale a alternativa que representa **CORRETAMENTE**

C) v nesse instante, nos meninos A, B e C, respectivamente: as direções e sentidos das forças resultantes que atuam,

a A)

F

B)

D)

C)

a

F D)

E)

v **15.** (UNESP–2010) Curvas com ligeiras inclinações em

a

circuitos automobilísticos são indicadas para aumentar

F a segurança do carro a altas velocidades, como, por **FÍSICA**

exemplo, no *Talladega Superspeedway*, um circuito

**13.** (FUVEST-SP) Um carrinho é largado do alto de uma *Association for Stoc Car Auto Racing* utilizado para corridas promovidas pela NASCAR (*National* ). Considere um carro

montanha-russa, conforme a figura.

como sendo um ponto material percorrendo uma pista

circular, de centro C, inclinada de um ângulo  $\alpha$  e com raio R, constantes, como mostra a figura, que apresenta

B g a frente do carro em um dos trechos da pista.

A Raio: R C

Ele se movimenta, sem atrito e sem soltar-se dos trilhos, até atingir o plano horizontal. Sabe-se que os raios de curvatura da pista em A e B são iguais. Considere as

seguintes afirmações:  $\alpha$

- I. No ponto A, a resultante das forças que agem sobre o carrinho é dirigida para baixo. Se a velocidade do carro tem módulo constante,
- II. A intensidade da força centrípeta que age sobre o é **CORRETO** afirmar que o carro

carrinho é maior em A do que em B. A) não possui aceleração vetorial.

- III. No ponto B, o peso do carrinho é maior do que a B) possui aceleração com módulo variável, direção radial

intensidade da força normal que o trilho exerce e no sentido para o ponto C. sobre ele.

C) possui aceleração com módulo variável e tangente à

Está **CORRETO** apenas o que se afirma em

trajetória circular.

A) I.

B) II. D) possui aceleração com módulo constante, direção

C) III. radial e no sentido para o ponto C.

D) I e III. E) possui aceleração com módulo constante e tangente

E) II e III. à trajetória circular.

Editora Bernoulli 9

Frente A Módulo 09

SEÇÃO ENEM

01. (Enem-2005) Observe o fenômeno indicado na tirinha a diante.

Fixação



01.  
D

02.  
B

03.

C

04.

B

05.

D

## Propos

01.

B

02.

B

A força que atua sobre o peso e produz o deslocamento vertical da garrafa é a força 03. B

A) de inércia.

B) gravitacional. 04. A

C) de empuxo.

D) centrípeta. 05. E

E) elástica.

06.

E

**02.** (Enem–2009) O Brasil pode se transformar no primeiro

07.

país das Américas a entrar no seleto grupo das nações que dispõem de trens-bala. O Ministério dos Transportes

08.  
E

prevê o lançamento do edital de licitação internacional para a construção da ferrovia de alta velocidade Rio-São

09.  
A

Paulo. A viagem ligará os 403 quilômetros entre a Central do Brasil, no Rio, e a Estação da Luz, no centro da capital

10.  
B

paulista, em uma hora e 25 minutos.

Disponível em: . 11. D

Acesso em: 14 jul. 2009.

12.  
E

Devido à alta velocidade, um dos problemas a ser enfrentado na escolha do trajeto que será percorrido pelo trem é o dimensionamento das curvas. Considerando-se que uma aceleração lateral confortável para os passageiros e segura para o trem seja de  $0,1g$ , em que  $g$  é a aceleração da gravidade (considerada igual a  $10\text{ m/s}^2$ ), e que a velocidade do trem se mantenha constante em todo o percurso, seria correto prever que as curvas

existentes no trajeto deveriam ter raio de curvatura

Seção

## Enem

mínimo de, aproximadamente,

A) 80 m. 01. D D) 1 600 m.

B) 430 m. E) 6 400 m.

02.

E

C) 800 m.

10 Coleção Estudo

## FÍSICA MÓDULO FRENTE

### Trabalho, potência e 10 A rendimento

Originalmente, o termo energia, do grego antigo *ergos*, Trabalho realizado por uma força

era utilizado para designar o trabalho. Atualmente, o termo energia está associado aos mais diferentes

temas: **constante** alimentação, esportes, meio ambiente, reações químicas;

enfim, o conceito de energia é importante nas mais diversas Considere um corpo deslocando-se entre dois pontos A e B,

áreas do conhecimento. através de uma trajetória qualquer. O corpo está submetido

a uma força  $F$  constante em módulo, direção e sentido. Seja

Neste módulo, estudaremos o conceito físico de trabalho.

d o vetor deslocamento realizado pelo corpo. Lembre-se de

Inicialmente, veremos quais são as grandezas que

que o deslocamento difere da distância percorrida.

determinam o valor do trabalho realizado por uma força

e aprenderemos a calcular esse trabalho. Em seguida,  $F$  apresentaremos o conceito de potência, que está relacionado

à rapidez com a qual certo trabalho é realizado. Finalizaremos

a teoria do módulo estudando o conceito de rendimento,  $\theta$



que está relacionado à potência útil obtida na realização de d certo trabalho.

**ENERGIA (E)** Matematicamente, o trabalho realizado pela força  $F$  ao

deslocar o corpo de A até B é dado pela relação:

Estamos habituados a utilizar o termo energia nos  
mais



diversos contextos, desde a energia contida nos alimentos  $W_{AB} = |F| \cdot |d| \cdot \cos \theta$  ou  $W_{AB} = F \cdot d \cdot \cos \theta$  que ingerimos, passando pela energia gasta nas atividades físicas, até a energia liberada nas explosões atômicas e nos

terremotos. No rótulo de uma lata de azeite, encontramos A relação nos mostra que

$1,26 \times 10^5$  • o trabalho é uma grandeza escalar; a informação de que a energia contida nesse alimento é de  $55 \text{ cal}$  ou  $5,27 \times 10^4 \text{ J}$ . A caloria (cal) e o joule (J)

são unidades utilizadas para medir a energia. O conceito • sua unidade, no SI, é o  $\text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$  (joule).

de energia foi um dos últimos a ser estruturado na O fato de o trabalho ter a mesma unidade que a

ciência moderna e está associado intimamente à ideia de energia não é coincidência, afinal, o trabalho mede

conservação. Isto é, nos diversos fenômenos observados a quantidade de energia que uma força transfere a

na natureza, algo sempre permanece constante, apesar um corpo;

e outras propriedades variarem. Estudaremos aqui apenas •  $\theta$  é o valor do ângulo entre os vetores  $F$  e  $d$ , podendo de a aparência, a forma, a cor, a temperatura, o volume,

o aspecto mecânico da energia, ou seja, aquele associado variar entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ ; aos conceitos de força. • o termo  $F \cdot \cos \theta$  mostra que devemos utilizar a

componente da força que está na mesma direção do

## CONCEITO DE TRABALHO ( $W$ )

deslocamento, isto é, parte da força pode não realizar

) trabalho  
algum;

• se  $F$  e  $d$  têm a mesma direção e sentido, então

O trabalho ( $W$ ) é a grandeza física que mede a quantidade de

$\theta = 0^\circ$ , como mostra a figura a seguir. Nesse caso, de uma força exercida pelo primeiro corpo sobre o

segundo, a expressão geral para o cálculo do trabalho reduz-se energia transferida de um corpo para outro por meio da ação

fazendo com que este sofra um deslocamento na mesma direção a  $w = F.d$  da força. Para que um sistema realize trabalho sobre um corpo,

é necessário que exista uma força e um deslocamento. Essas  $F$  e  $d$  grandezas são necessárias, mas sua existência não é suficiente

$$\theta = 0 \Rightarrow W = F.d$$

para garantir a realização de trabalho.

Editora Bernoulli 11

## Frente A Módulo 10

Sempre que o trabalho assume valores positivos,  
**Trabalho realizado pela força peso**

como na situação mostrada na figura anterior e

em outras cujo ângulo entre os vetores Quando um objeto se desloca de um ponto para outro, em  $F$  e  $d$  está

compreendido entre  $0^\circ$  uma região na qual a força peso atua, podemos determinar  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ ,

o sistema está

recebendo energia da força o trabalho realizado por essa força utilizando a expressão  $F \cdot d \cdot \cos \theta$ , isto é, a força  $F$  está

transferindo energia para o sistema; geral  $W = F \cdot d \cdot \cos \theta$ .

- se  $F$  e  $d$  têm a mesma direção, porém sentidos opostos, então  $\theta = 180^\circ$ , como mostra a figura a seguir. Nesse caso, a expressão geral para o cálculo  $P \cdot \theta$

do trabalho reduz-se a  $W = -F \cdot d$

$\theta$

$d$

$F$

Como o módulo do deslocamento depende apenas das

$\theta = 180^\circ \Rightarrow W = -F \cdot d$  posições inicial e final do corpo, não importando a trajetória

seguida por ele, o valor do trabalho realizado pela força peso

Sempre que o valor do trabalho assume valores será sempre o mesmo e igual a:

negativos, como na situação mostrada na figura h  
 $W = F.d.\cos \theta \Rightarrow W = P.d.\cos \theta \Rightarrow W = P.d. \Rightarrow$   
 $W = P.h$  anterior e em outras cujo ângulo  $\theta$  está  
compreendido  $_{P P} d_P$

entre  $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ , o sistema está perdendo  
Quando o corpo cai,  $W = P.h$ , e, quando o corpo  
sobe,  $W = -P.h.$   $_{P P}$

energia devido à ação da força  $F$ , isto é, a força  $F$   
Esse estudo mostra que a força peso não realiza  
trabalho

está retirando energia do sistema; quando o  
deslocamento do corpo é horizontal, uma vez

que, nessa situação, os vetores força e deslocamento  
são

- se  $F$  e  $d$  são perpendiculares, então  $\theta = 90^\circ$ , como  
perpendiculares ( $\theta = 90^\circ$ ); logo, a força peso não  
transfere  
na situação mostrada na figura a seguir.

energia  
para o  
corpo.

v Forças cujo valor do trabalho realizado não depende  
da

trajetória descrita pelo corpo sobre o qual atuam,  
como é o

caso da força peso, são denominadas **forças**

**conservativas.**

Forças de atrito ou de resistência dos fluidos não satisfazem a essa condição, pois o valor do trabalho realizado por essas forças depende da trajetória seguida pelo corpo sobre o qual  $F_{cp}$  atuam. Essas forças são denominadas **não conservativas.**

## c Trabalho realizado pela força resultante

$\theta = 90^\circ \Rightarrow W = 0$  Em muitas situações, várias são as forças que atuam sobre um corpo, algumas transferindo energia para o corpo e outras retirando energia dele.

Nesse caso, o valor do trabalho é nulo, uma vez que

$\cos 90^\circ = 0$ . Isso indica que a força não realiza N

trabalho, isto é, nenhuma energia está sendo  $F d$  transferida para o sistema ou sendo retirada dele.

A força resultante centrípeta nunca realiza  $F_A$  trabalho, pois essa força sempre atua sobre o corpo perpendicularmente ao seu deslocamento.  
P

## 12 Coleção Estudo

### Trabalho, potência e rendimento

Para determinarmos o valor do trabalho total realizado Embora tenhamos feito a analogia somente para o caso de

sobre o corpo, podemos seguir dois caminhos que se a força apresentar módulo constante, pode-se provar que esse

equivalem: procedimento é válido mesmo nos casos em que o módulo da

força é variável, como mostra a figura a seguir:

A) Calculamos, inicialmente, o trabalho realizado

por cada uma das forças agindo individualmente,  
 $A_1 + A_2 = W$   $W = F d \cos \theta$  ;  $W = F d \cos \theta$  ;  $W = F d \cos \theta$  ; etc. (Soma algébrica) 1 1 1 1 2 2 2 2 n n n n Uma vez determinado o valor do trabalho realizado

por cada uma das forças, basta somar

algebricamente  $F$

o valor desses trabalhos, considerando o sinal positivo

e negativo de cada um deles:  $W = W_1 + W_2 + \dots + W_n$

A1

B) Determinamos, inicialmente, a força resultante

que atua sobre o sistema:  $F_R = F_1 + F_2 + \dots + F_n$   
Ad 2 Em seguida, calculamos o valor do trabalho total

realizado por essa força  $W = F_R \cdot d \cdot \cos \theta$

Ambos os caminhos conduzem ao mesmo resultado.

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

É importante lembrar que o conceito de trabalho realizado

por uma força está associado à energia que é transferida

ao corpo por essa força. **01.** A figura a seguir mostra as quatro forças que atuam sobre

um bloco que desliza em um plano inclinado, indo de A

para B. As forças representadas possuem os seguintes

## Determinação gráfica do trabalho

módulos  $F = 15 \text{ N}$ ,  $F_g = 3 \text{ N}$ ,  $P = 20 \text{ N}$  e  $N = 15 \text{ N}$ . A



No estudo da Cinemática, vimos que, para um corpo em F

movimento uniforme, a distância  $d$  percorrida pelo corpo N **FÍSICA** pode ser determinada pela relação  $d = vt$ . Graficamente, 10 m

essa distância pode ser calculada determinando-se o valor F A

da área sob a curva do gráfico de velocidade *versus* tempo,

como indicado a seguir: A

Velocidade (km/h) O trajeto de A até B tem 25 m de comprimento.

Área = distância n Determinar

60

A) o valor do trabalho realizado por cada força.

$d = vt$  B) o valor do trabalho total realizado.

C) o valor da energia recebida ou retirada do bloco.

**Resolução**

0 1 2 3 4

Tempo (h) A) O trabalho realizado por cada força pode ser determinado

utilizando-se a equação  $W = F \cdot d \cdot \cos \theta$ :

Quando a força aplicada sobre um corpo é paralela ao

deslocamento deste, podemos, por analogia, inferir que:  $W = F \cdot d \cdot \cos \theta = 15 \cdot 25 \cdot \cos 0^\circ = 375 \text{ J}_F$

$$W_A = F_A \cdot d \cdot \cos \theta = 3 \cdot 25 \cdot \cos 180^\circ = -75 \text{ J}$$

$$\text{Força (N)} \quad W_P = -P \cdot h = -20 \cdot 10 = -200 \text{ J}$$

$$60 \text{ Área} = \text{trabalho}_{NN} \quad W = N \cdot d \cdot \cos \theta = 15 \cdot 25 \cdot \cos 90^\circ = 0 \text{ J}$$

B) O trabalho total realizado é igual à soma algébrica dos valores encontrados no item A, ou seja,

$$W = F \cdot d$$

$$(+375 \text{ J}) + (-75 \text{ J}) + (-200 \text{ J}) + 0 \text{ J} = +100 \text{ J}.$$

C) Como o trabalho total realizado sobre o bloco foi

0 1 2 3 4 positivo e igual a 100 J, isso indica que o bloco ganhou

Deslocamento (m) 100 J de energia durante o trajeto de A até B.

Editora Bernoulli **13**

## Frente A Módulo 10

# Potência EXERCÍCIO RESOLVIDO

Utilizamos máquinas para realizar forças sobre objetos e

para os deslocar. Isso nos poupa muito esforço muscular. **02.** Um elevador de 1 000 kg sobe uma altura de 60 m, em

Imagine um guindaste erguendo um contêiner de massa  $m$  meio minuto.

a uma altura  $h$ , como mostrado na imagem a seguir.

Dado:  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .

A) Qual a velocidade do elevador?



B) Qual a potência média desenvolvida pelos motores

do  
elevador

**Resolução**

A) Supondo que o valor da velocidade do elevador

permaneça constante, podemos dizer que sua

velocidade foi de  $2 \text{ m/s}$ , pois ele percorre  $60 \text{ m}$  em  $30 \text{ s}$ .

c.hu B) Para determinar o valor da potência média desenvolvida

.SX

www pelos motores para puxar o elevador, podemos utilizar

a definição de potência:

Dois motores distintos podem erguer o contêiner da

figura anterior, a uma mesma altura  $h$ , em tempos diferentes.  $W = mgh$ .  $= mg \cdot v \cdot P \Rightarrow P = \frac{1\,000 \cdot 10 \cdot 2}{\Delta t} = \frac{20\,000}{\Delta t}$

Ambos realizam o mesmo trabalho ( $W = Ph$ ), porém uma  $P = 20\,000\text{ W}$  máquina o realiza em menos tempo. Dizemos, então, que

as máquinas apresentam potências diferentes. A potência

é uma grandeza física que mede a rapidez com a qual uma **RENDIMENTO** força realiza trabalho, isto é, o ritmo no qual um sistema

transfere energia para outro. Matematicamente, podemos

Hoje em dia, as lâmpadas incandescentes (fig. a) estão escrever que:

sendo, gradativamente, substituídas por lâmpadas compactas

Trabalho (energia transferida)  $W$  fluorescentes (fig. b), que, em um período de tempo não

Potência = ou  $P =$

Intervallo de tempo  $\Delta t$  muito longo, devem ceder lugar às lâmpadas com tecnologia

LED (fig. c). Não é um mero jogo de mercado, pois,

No Sistema Internacional de Unidades, o trabalho é medido por trás dessas trocas está uma intensa negociação energética.

em joule (J), e o intervalo de tempo, em segundo (s). Dessa Afinal, o que desejamos quando acendemos uma lâmpada?

maneira, a potência é medida em = = watt (W). Luz, com certeza! Vejamos, então, o que cada uma dessas joule J

segundo s

tecnologias associadas às lâmpadas nos fornece, quando

Essa unidade, watt, é uma homenagem a James Watt

transformações energéticas ocorrem.

(1736-1819), que muito contribuiu para aperfeiçoar as

máquinas a vapor, impulsionando dessa forma a Primeira



Revolução Industrial. Quando compramos uma

lâmpada

de 25 W (25 watts), significa que, a cada segundo que a

lâmpada fica ligada, ela transforma 25 J de energia elétrica

em outras formas de energia (luz, calor, etc.). Por isso, uma lâmpada de 25 W brilha mais que outra de 15 W.

Quando vamos comprar um aparelho elétrico qualquer,

devemos estar atentos à sua potência, pois quanto maior

a potência, maior será o “consumo” (transformação) de

energia envolvido e, conseqüentemente, maior será o custo. (a) (b) (c)

Por motivos históricos, utilizamos outras unidades de Lâmpadas de diferentes tecnologias: (a) *incandescente*;

potência que não o watt, como o cavalo-vapor (cv) e (b) *compacta*; (c) *LED*.

o *horse-power* (hp). As relações entre essas unidades e o A tabela a seguir fornece um quadro comparativo entre

watt são: as lâmpadas incandescentes e fluorescentes e mostra

1 hp = 445 W os valores das transformações energéticas que ocorrem

1 cv = 435 W nessas lâmpadas.

## 14 Coleção Estudo

# Trabalho, potência e rendimento

## Energia Energia EXERCÍCIO RESOLVIDO

Tecnologia Energia térmica elétrica luminosa usada emitida  
recebida emitida

**03.** Um motor elétrico de potência 2 kW apresenta rendimento

Incandescente 100 J 5 J 95 J de 80% e é utilizado para erguer, com  
velocidade

constante, um objeto de 40 kg. Qual é o módulo da

Compacta PL 100 J 90 J 10 J velocidade com a qual o objeto é  
transportado? Use

g  
=  
10  
m/  
s<sup>2</sup>

Observe que, de cada 100 J de energia elétrica,  
apenas *Resolução:*

5 J são transformados em energia luminosa na  
lâmpada Como o rendimento do motor é de 80%, temos que,

incandescente, enquanto esse valor chega a 90 J na  
lâmpada dos 2 000 W de potência total, apenas 1 600 W serão

fluorescente compacta. Assim, dizemos que a eficiência ou o efetivamente utilizados para movimentar o objeto, isto é,

rendimento da lâmpada incandescente é de 5% (5 J/100 J), a potência útil do motor é de 1 600 W.

enquanto o rendimento da lâmpada compacta PL é de 90% A velocidade  $v$  com a qual o objeto é transportado está

(90 J/100 J). relacionada à potência útil do motor,  $P$ , por meio da

$u$

seguinte relação:



$$P = F \cdot v_u$$

Energia Em que  $F$  é a força que o motor exerce sobre o objeto luminosa para erguê-lo. Como o objeto é erguido com velocidade (5 unidades constante, temos que o módulo da força exercida pelo de energia)

motor sobre o objeto é igual ao módulo do peso deste.

■ ■

Assim, temos que a velocidade com a qual o objeto é



transportado é dada por:

Energia

Energia elétrica térmica  $P = F.v \Rightarrow 1\,600\text{ W} = 400\text{ N}.v \Rightarrow v = 4\text{ m/s}$  (100 unidades (95 unidades (95 unid

de energia) de energia) de ener **FÍSICA**

## EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

Energia **01.** (PUC Minas) Considere um corpo sendo arrastado, com

(90 unidades luminosa velocidade constante, sobre uma superfície horizontal

de energia) onde o atrito não é desprezível. Considere as afirmações

I, II e III a respeito da situação descrita:

I. O trabalho da força de atrito é nulo.



Energia II. O trabalho da força peso é nulo.



Energia elétrica térmica



(100 unidades (10 unidades III. A força que arrasta o corpo é nula.



de energia) de energia)

A afirmação está **INCORRETA** em

A) I, apenas. C) II, apenas.



Define-se o rendimento  $\eta$  de uma transformação energética B) I e III, apenas. D) I, II e III.

como a razão entre a energia útil obtida e a energia total

recebida. Podemos trocar a grandeza energia por potência, **02.** (Unimontes-MG–2009) Uma bomba de 5,0 HP é usada

uma vez que a potência apenas representa a energia por para retirar água de um poço cuja profundidade é

unidade de tempo. Matematicamente, temos que: 18 metros, sendo  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ,  $1 \text{ HP} = 750 \text{ W}$  e a

densidade da água igual a  $1\,000 \text{ kg/m}^3$ . Se, em 7 horas

$\eta$  P de operação, foram retirados 420 000 litros de água,  $\eta_{\text{UTIL}} = P$  o rendimento da bomba foi de  $\eta_{\text{TOTAL}}$

A)  
50%.

Observe que o rendimento é uma razão entre duas grandezas B) 20%.

I

que apresentam a mesma unidade (joule ou watt); por isso, C) 80%.

"

o rendimento é uma grandeza adimensional. D) 60%.

I

"





# Frente A Módulo 10

**03.** (UEL-PR) Um pêndulo é constituído de uma esfera de

## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

massa 2,0 kg, presa a um fio de massa desprezível e

comprimento 2,0 m, que pende do teto, conforme figura

a seguir. O pêndulo oscila formando um ângulo máximo **01.** (PUC Rio) Durante a aula de Educação Física, ao realizar

de  $60^\circ$  com a vertical. um exercício, um aluno levanta verticalmente um

peso com sua mão, mantendo, durante o movimento,

a velocidade constante.

$60^\circ$  Pode-se afirmar que o trabalho realizado pelo aluno é

A) positivo, pois a força exercida pelo aluno atua na

mesma direção e sentido oposto ao do movimento

do  
peso.

B) positivo, pois a força exercida pelo aluno atua na

Nessas condições, o trabalho realizado pela força de mesma direção e sentido do movimento do peso.

tração que o fio exerce sobre a esfera, entre a posição C) zero, uma vez que o movimento tem velocidade

mais baixa e mais alta, em joules, vale constante.

A) 20. D) negativo, pois a força exercida pelo aluno atua na C) zero.  
E) -20.

mesma direção e sentido oposto ao do movimento

B) 10. D) -10. do peso.

**04.** E) negativo, pois a força exercida pelo aluno atua na

(UFSCar-SP) Um bloco de 10 kg movimenta-se em linha mesma direção e sentido do movimento do peso.

reta sobre uma mesa lisa, em posição horizontal, sob a

ação de uma força variável que atua na mesma direção **02.** (UFT) Dois serventes de pedreiro – Chico e João – erguem

do movimento, conforme o gráfico a seguir. O trabalho baldes de concreto do solo até o segundo andar de um

realizado pela força quando o bloco se desloca da origem edifício.

até o ponto  $x = 6$  m é Chico usa um sistema com duas roldanas – uma fixa e

F (N) uma móvel –, enquanto João usa um sistema com uma

2 única roldana fixa, como mostrado nesta figura:

1

0  $w_1$   $w_2$   $w_3$   $w_4$   $w_5$   $w_6$

1 2 3 4 5 6 x (m)

-1

-2

A) 1 J. C) 4 J. E) 2 J.

B) 6 J. D) zero.

05. (FUVEST-SP) Uma empilhadeira elétrica transporta do chão



até uma prateleira, a 6 m do chão, um pacote de 120 kg.



O gráfico adiante ilustra a altura do pacote em função do tempo. A potência aplicada ao corpo pela empilhadeira é

$h$  (m)

Chico João

6,0

Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que, para erguer baldes de mesma massa até uma mesma

altura, com velocidade constante,

3,0 A) Chico faz a mesma força que João, mas gasta mais

energia  
que  
ele.

B) Chico faz a mesma força que João, mas gasta menos

energia  
que  
ele.

0

0 C) Chico faz uma força menor que João, mas gasta, 10 20 t (s)



aproximadamente, a mesma energia que ele.

A) 120 W. C) 720 W. E) 2 400 W. D) Chico faz uma força menor que João, mas gasta mais

B) 360 W. D) 1 200 W. energia que ele.

## 16 Coleção Estudo

# Trabalho, potência e rendimento

**03.** (UEL-PR) O gráfico representa o valor algébrico da força Os trabalhos realizados entre os pontos A e C, pelo peso

resultante  $F$  que age sobre um corpo de massa 5,0 kg, ( $P$ ) do carrinho e pela reação normal ( $N$ ) exercida pelos

inicialmente em repouso, em função da abscissa  $x$ . trilhos sobre o vagão, correspondem, respectivamente, a

$$F \text{ (N)} \quad A) -|P|(h_1 + h_2) \text{ e } |N|(h_1 + h_2).$$

$$B) -|P|(h_1 + h_2) \text{ e } 0.$$

$$C) -|P|h \text{ e } |N|h.$$

$$D) -|P|h \text{ e } 0.$$

10 E) N.d.a.

**06.** (Unimontes-MG) Um pequeno carrinho movimenta-se, sem

atrito, numa montanha-russa (veja a figura). Sua energia 2,0 J

potencial, que é máxima no ponto A, é medida a partir

do nível do solo. O trecho CD é retilíneo.

O trabalho realizado por  $F$ , no deslocamento de  $x = 0$  até

$x = 4,0$  m, em joules, vale C D

A

A) zero.

B) 10.

B

C) 20.

Nível do solo

D) 30.

Considere as seguintes afirmativas a respeito da situação

E) 40.

descrita:

**04.** I. O trabalho realizado pela força gravitacional sobre o

(UNESP) O teste Margaria de corrida em escada é um

carrinho é positivo no trajeto de A para B.

meio rápido de medida de potência anaeróbica de uma

pessoa. Consiste em fazê-la subir uma escada de dois II. O trabalho realizado pela força gravitacional sobre o

carrinho é positivo no trajeto de B para C.

em dois degraus, cada um com 18 cm de altura, partindo

## FÍSICA

com velocidade máxima e constante de uma distância III. O trabalho realizado pela força gravitacional sobre o

de alguns metros da escada. Quando pisa no 8º degrau, carrinho é nulo no trajeto de C para D.

a pessoa aciona um cronômetro, que se desliga quando Estão  
**CORRETAS** as afirmativas

pisa no 12º degrau. Se o intervalo de tempo registrado A) I, II e III.

para uma pessoa de 70 kg foi de 2,8 s e considerando a B) I e II,  
apenas.

aceleração da gravidade igual a  $10 \text{ m/s}^2$ , a potência média C) I e III,  
apenas.

avaliada por esse método foi de

D) II e III, apenas.

A) 180 W.

**B) 220 W. 07.** (UNESP–2009) Suponha que os tratores 1 e 2  
da

C) 432 W. figura arrastem toras de mesma massa pelas rampas

D) 500 W. correspondentes, elevando-as à mesma altura  $h$ . Sabe-se

E) 644 W. que ambos se movimentam com velocidades constantes e

que o comprimento da rampa 2 é o dobro do comprimento

**05.** (UERJ) Um pequeno vagão, deslocando-se sobre trilhos, da  
rampa 1.

realiza o percurso entre os pontos A e C, segundo a 1 2

forma representada na figura a seguir, onde  $h_1$  e  $h_2$  são

$h$

os desníveis do trajeto. 1 2

C

Chamando de  $\tau_1$  e  $\tau_2$  os trabalhos realizados pela força

$h_2$  gravitacional sobre essas toras, pode-se afirmar que

$$h_1 \text{ A) } \tau = 2\tau; \tau > 0 \text{ e } \tau < 0. \text{.1212}$$

$$\text{B) } \tau = 2\tau; \tau < 0 \text{ e } \tau > 0. \text{.1212}$$

$$\text{A C) } \tau = \tau; \tau < 0 \text{ e } \tau < 0. \text{.1212}$$

$$\text{B D) } 2\tau = \tau; \tau < 0 \text{ e } \tau < 0. \text{.1212}$$

Editora Bernoulli 17

## Frente A Módulo 10

**08.** (UFMG–2006) Marcos e Valério puxam, cada um, uma Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que

mala de mesma massa até uma altura  $h$ , com velocidade A)  $2F = F$  e  $T = T$ . .111111

constante, como representado nas figuras a seguir. B)  $F = 2F$  e  $T = T$ . .111111

Marcos C)  $2F = F$  e  $2T = T$ . Valério .111111

D)  
 $F_I$   
 $=$   
 $2F_{II}$   
e  
 $T_I$   
 $=$   
 $2T_{II}$ .

**10.** (FUVEST-SP) Nos manuais de automóveis, a caracterização dos motores é feita em cv (cavalo-vapor). Essa unidade, h proposta no tempo das primeiras máquinas a vapor, h correspondia à capacidade de um cavalo típico, que

conseguia erguer, na vertical, com auxílio de uma roldana, um bloco de 75 kg, à velocidade de 1 m/s. Para subir uma ladeira inclinada, como na figura, um carro de 1 000 kg, mantendo uma velocidade constante de 15 m/s (54 km/h), desenvolve uma potência útil que, em cv, é,

Marcos puxa sua mala verticalmente, enquanto Valério aproximadamente, de

arrasta a sua sobre uma rampa. Ambos gastam o mesmo  $v = 15 \text{ m/s}$

tempo nessa operação.

Despreze as massas das cordas e qualquer tipo de atrito.

Sejam  $P_M$  e  $P_V$  as potências e  $T_M$  e  $T_V$  os trabalhos realizados por, respectivamente, Marcos e Valério.  $\theta$

Considerando-se essas informações, é **CORRETO**

( $\sin \theta \approx 0,1$ )

afirmar que

A)  $T_A = 20 \text{ cv}$ ,  $T_M = T_V$  e  $P_M = P_V$ .

B)  $T_B = 40 \text{ cv}$ ,  $T_M > T_V$  e  $P_M > P_V$ .

C)  $T_C = 50 \text{ cv}$ ,  $T_M = T_V$  e  $P_M > P_V$ .

D)  $T_D > T_C$  e  $P_D = P_C$ .

E)  $T_E = 150 \text{ cv}$ .

**09.** (UFMG–2007) Antônio precisa elevar um bloco até uma

altura  $h$ . Para isso, ele dispõe de uma roldana e de uma **11.**  
(FUVEST-SP) Em uma caminhada, um jovem consome

corda e imagina duas maneiras para realizar a tarefa, 1 litro de  $O_2$  por minuto, quantidade exigida por

como mostrado nestas figuras: reações que fornecem a seu organismo 20 kJ/minuto

(ou 5 “calorias dietéticas”/minuto). Em dado momento,

o jovem passa a correr, voltando depois a caminhar.

O gráfico representa seu consumo de oxigênio em função

do  
tempo.

$F_I$

Consumo de  $O_2$  (L/min)

$F_{II}$

2

1

h 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 h t (minutos)

Por ter corrido, o jovem utilizou uma quantidade de energia a mais do que se tivesse apenas caminhado

I II

durante todo o tempo, aproximadamente, de

Despreze a massa da corda e a da roldana e considere A) 10 kJ.

que o bloco se move com velocidade constante.

B)  
21  
kJ.

Sejam  $F_I$  o módulo da força necessária para elevar o

bloco e T o trabalho realizado por essa força na situação I C) 200 kJ.  
mostrada na figura I. Na situação mostrada na figura II, D) 420 kJ.  
essas grandezas são, respectivamente,  $F_{II}$  e  $T_{II}$ . E) 480 kJ.

## 18 Coleção Estudo

# Trabalho, potência e rendimento

**12.** (Mackenzie-SP) A figura a seguir representa um motor A) **FAÇA** um diagrama das forças que atuam sobre o

elétrico M que eleva um bloco de massa 20 kg com bloco e **IDENTIFIQUE** cada uma das forças.

velocidade constante de 2 m/s. A resistência do ar é B) **CALCULE** a tração no cabo que está em contato com

desprezível e o fio que sustenta o bloco é ideal. Nessa a mão do operário e o trabalho realizado por ele, para

operação, o motor apresenta um rendimento de 80%. elevar o bloco até o segundo andar da obra.

Considerando o módulo da aceleração da gravidade como

$g = 10 \text{ m/s}^2$ , a potência dissipada por este motor tem valor 2 C) Se foi gasto um tempo  $t = 10 \text{ s}$  para o operário elevar

o bloco até o segundo andar da obra, **CALCULE** a

M potência gasta nessa tarefa.

**14.** (FAAP-SP) O gráfico apresenta a variação das forças  $F_1$  e  $f_{at}$  (força de atrito) que agem num corpo que se desloca sobre o eixo x.

A) 500 W. 80 F<sub>1</sub>

B) 400 W. 60

C) 300 W. 40

D) 200 W.

20

E) 100 W.

5 1 0 1 5

0

**13.** (UFJF-MG–2010) Em uma construção civil, os operários  $x$  (m) – 20 usam algumas máquinas simples para facilitar e diminuir  $f_{at}$

sua carga diária de energia gasta na execução de seu

trabalho. Uma das máquinas simples mais utilizadas **CALCULE**

são, por exemplo, as roldanas fixas e móveis. Em um FÍSICA A) o trabalho da força  $F_1$  para arrastar o corpo no dia comum de trabalho, um operário deve elevar, com primeiros 10 m.

velocidade constante, um bloco de pedra de massa B) o trabalho da força de atrito enquanto o corpo é



$m = 100 \text{ kg}$  para o segundo andar da obra, que fica a uma arrastado nos primeiros  $10 \text{ m}$ .

altura  $h = 5,0 \text{ m}$  em relação ao solo. Para essa tarefa, o C) o trabalho da força resultante para arrastar o corpo

operário utilizou um sistema com duas roldanas, uma fixa nos primeiros  $15 \text{ m}$ .

e outra móvel, e um cabo de massa desprezível, como

mostra a figura. Considere  $g = 10 \text{ m/s}^2$ . **15.** (OBF)  
Um motor de potência  $2,1 \text{ kW}$  puxa, com velocidade

constante e igual a  $3 \text{ m/s}$ , uma caixa de massa  $80 \text{ kg}$  sobre um plano inclinado de  $30^\circ$  com a horizontal. A caixa é puxada por uma extensão de  $6 \text{ m}$  ao longo do plano, do ponto A ao B (ver figura). Despreze as massas da corda e da polia.



$$h = 5$$

A) **CALCULE** o módulo da força exercida pelo motor e o módulo da força de atrito.



B) **CALCULE** os trabalhos realizados pela força peso, pela

força normal, pela força exercida pelo motor e pela  
força de atrito quando a caixa se desloca de A para B.

Editora Bernoulli 19

## Frente A Módulo 10

**16.** (ITA-SP) Uma escada rolante transporta passageiros. Pode-se verificar que a eficiência dos fogões aumenta

do andar térreo A ao andar superior B, com velocidade A) à medida que diminui o custo dos combustíveis.

constante. A escada tem comprimento total igual a 15 m, B) à medida que passam a empregar combustíveis

degraus em número de 75 e inclinação igual a  $30^\circ$ . renováveis.

Dados:  $\sin 30^\circ = 0,5$ ; C) cerca de duas vezes, quando se substitui fogão a

$g = 10 \text{ m/s}^2$ . lenha por fogão a gás.

**DETERMINE** D) cerca de duas vezes, quando se substitui fogão a gás

por fogão elétrico.

A) o trabalho da força motora necessária para elevar um

passageiro de 80 kg de A até B. E) quando são utilizados combustíveis sólidos.

B) a potência correspondente ao item anterior,

empregada pelo motor que

# aciona o mecanismo, GABARITO efetuando o transporte em 30 s.

C) o rendimento do motor, sabendo-se que sua potência

total é 400 watts. **Fixação**

01. B 02. C 03. C 04. E 05. B

## SEÇÃO ENEM

## Propos

**01.** (Enem–1998) A eficiência de uma usina, do tipo da 01. B

representada na figura, é da ordem de 0,9, ou seja, 02. C

90% da energia da água no início do processo se 03. C

transformam em energia elétrica. A usina Ji-Paraná, 04. A

do estado de Rondônia, tem potência instalada de

05.  
D

512 milhões de watt, e a barragem tem altura de

06.  
C

aproximadamente 120 m. A vazão do Rio Ji-Paraná, em

07.  
C

litros de água por segundo, deve ser da ordem de

08.  
A

10.

A

Gerador 11. C

12.

A

h

13.

A)

T

T = Tração

P = Peso

Turbina

P

A) 50. C) 5 000. E) 500 000.

B) T = 500 N e W =  $5,0 \times 10^3$  J

B) 500. D) 50 000.

C) P =  $5,0 \times 10^2$  W

**02.** 14. A) 400 J (ENEM–2003) A eficiência do fogão de cozinha pode ser

analisada em relação ao tipo de energia que ele utiliza. B) –100 J

O gráfico abaixo mostra a eficiência de diferentes tipos C) 600 J

de fogão. 15. A)  $F_m = 700$  N;  $F_{\text{atrito}} = 300$  N

Eficiência do fogão (%) B)  $W_M = 4\,200$  J;  $W_A = -1\,800$  J

$W_P = -2\,400$  J;  $W_N = 0$

70 16. A)  $6,0 \times 10^3$  J

60

50 B)  $2,0 \times 10^2$  W

40 C) 50%

30

## 20 Seção Enem<sub>10</sub>

0

Fogão a 01. E 02. C Fogão a Fogões a Fogões a Fogões  
lenha carvão querosene gás elétricos

20 Coleção Estudo

## FÍSICA MÓDULO FRENTE

### Leis de Kepler 09 B

Desde épocas remotas, o homem sabe que as estrelas  
e as

constelações, como o Cruzeiro do Sul, movem-se em  
trajetórias

circulares em torno da Terra, sem jamais mudarem a  
forma de

sua trajetória. O homem primitivo notou, também, que, além PÉGASO

do Sol e da Lua, outros cinco corpos celestes — os planetas

Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno — moviam-se 1 ° Jan ALTAIR entre as estrelas. Da Antiguidade à Idade Média, diversas 1 ° Dez teorias foram propostas para explicar os movimentos dos 1 1 ° Nov ° Ago astros. No início do século XVII, o sistema heliocêntrico, 1 ° jul 1 ° Set proposto por Nicolau Copérnico, foi reconhecido como o mais 1 ° Jun CAPRICÓRNIO 1 ° Out apropriado para a descrição desses movimentos. Logo após o

reconhecimento desse sistema, o astrônomo alemão Johannes 1 ° Mai Kepler estabeleceu três relações matemáticas para descrever

as órbitas dos planetas do Sistema Solar. Essas relações, FOMALHAUT atualmente conhecidas como Leis de Kepler, constituem o

escopo deste módulo. *Figura 1: Movimento retrógrado de Marte.*

-

Iniciaremos este estudo com uma breve descrição  
Um dos primeiros modelos de sistema planetário foi



histórica das teorias sobre os movimentos dos corpos  
proposto pelo grego Eudóxio, discípulo de Platão.  
Nesse

\_\_\_\_\_

celestes. Em seguida, apresentaremos as três Leis de  
Kepler, modelo, as estrelas, o Sol, a Lua e os planetas  
permanecem

|

que foram obtidas empiricamente a partir de medições  
das fixos sobre superfícies de esferas concêntricas. As  
esferas

-

posições dos planetas do Sistema Solar em suas  
respectivas são ligadas entre si por meio de eixos, de  
forma que cada

||  
órbitas em torno do Sol. Veremos que essas leis aplicam-se a uma das esferas gira em relação às outras. A Terra é fixa e

-  
imóvel no centro comum das esferas.

|  
outras órbitas, tais como a de um cometa em torno do Sol ou

|  
a de um satélite em torno de um planeta. Na verdade, as Leis O grego Claudius Ptolomeu propôs um modelo de sistema

|  
de Kepler são leis universais. A universalidade dessas leis planetário, no qual o Sol, a Lua e os planetas descrevem

-  
foi esclarecida por Newton na ocasião em que ele elaborou grandes órbitas circulares em torno da Terra. Além disso,

Teoria da Gravitação Universal. esses astros giram em pequenos círculos centrados nas

---

órbitas principais, como mostra a figura 2. Por meio



combinação de movimentos, o modelo geocêntrico explica

**SISTEMAS PLANETÁRIOS** bem a trajetória irregular do planeta Marte.

Utilizando a Terra como referencial, os movimentos Terra

observados para o Sol, para a Lua e para o conjunto de

estrelas são regulares e simples. Entretanto, os movimentos Lua Júpiter

observados para os planetas são mais complicados.

Por exemplo, o planeta Marte, quando observado durante Mercúrio Marte Saturno vários meses, apresenta uma curiosa mudança no sentido

de sua trajetória, conforme mostrado na figura 1. Nos três

Vênus

primeiros meses de observação, note que o planeta se

move da direita para a esquerda. Em seguida, a trajetória

é invertida, e o movimento se mantém da esquerda para a direita durante cerca de dois meses, quando, então,

a tendência inicial do movimento é restabelecida. *Figura 2: Sistema planetário de Ptolomeu.*

Editora Bernoulli 21

•

•

\_\_\_\_\_

|

||

|

|

|

|

████████████████████

•

||

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35



11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

\_\_\_\_\_

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

\_\_\_\_\_

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

"

-

"

-

"

|



|



.



.



|

.



|



|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

|

.

.

-

|

|

|

|

.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

.

.

"

.

\_\_\_\_\_

.

.

-

-

\_\_\_\_\_

.

"

\_\_\_\_\_





\_\_\_\_\_

■

■

\_\_\_\_\_

■

■

\_\_\_\_\_

■

\_\_\_\_\_

■

■

\_\_\_\_\_

■

■

\_\_\_\_\_

■

■

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

■

■

\_\_\_\_\_

■

■

—

•

•

—

|

•

|

—

|

|

—

|

||

■

|

|

■

•

•

•

•

•

—

•

"

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

\_\_\_\_\_

•

"

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

\_\_\_\_\_

•

•

•

.

.

—

—

.

.

.

.

.

—

|

.

.

|

.

|

.

.

|

.

|

.

.

|



.

|

.

.

|

.

|

.

.

|

.

■

—

—

■

■

|

.

.

|

.

|

.

.

|

.

█

▬

▬

▬

█

▬

"

▬

.

"

.

.

.

.

▬

|

.

.

.

.

.

|

█

.

"

"

"

-

||

■

|

||

■

.

.

.

.

|

.

"

"

|

.

.

-

.

|

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

-

■

"

-

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

|

||

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

■

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

|

-

-

.

-





\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

|

.

.

|

.

.

•

-

•

|

•

•

•

•

•

|

|

•

•

|

•

-

•

-

•

|

•

•

•

•

.

|

■

—

—

■

—

—

—

—

—

■

—

—

—

—

—

■

.

—

—

|

.

.

|

•

•

|

•

-

•

-

•

|

•

•

•

•

•

|

|

•

•

|

•

•

|

•

.

.

.

.

.

.

.

.

.

.

|

■

—

—

■

—

—

■

—

—

■

—

—

■

.

.

.

|

-

"

"

-

"

|

.

.

.

.

.

.

.

.

.

|

||

.

.

.

.

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

.

.

|

.

.

|

.

.

|

.

.

|

.

.

|

.

.

|

.

.

|

.

.

|



•

•



•



•

—

—

|

||

■

”

■

■

■

”

—————

•

■

■

—————

—————

•

■

■

—————

—————

•

■

■

—

·

·

·

·

·

—

·

·

—

·

·

—

·

·

—

·

·

—

—

·

·

·

—

.

■

.

■

.

————

.

.

—

.

.

—

.

.

————

■

||

—

■

■

■

.

.

■

■

•

|

•

-

•

-

•

|

•

•

•

•

•

|

"

"

•

|

|

"

"

|

"

"

||

"

-

"

-

"

||

"

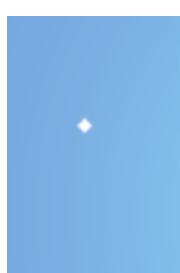
"

"

"

"

||



—

.

—

.

■

|

.

—

—

|

.

.

|

|

.

.

||

■

—

—

■

.

—

-

.

\_\_\_\_\_

.

-

\_\_\_\_\_

.

-

.

"

-

|

.

.

|

.

.

|

|

.

.

|



.

.

|

|

.

|

.

.

|

.

.

|

|

.

.

|

.

.

|

\_\_\_\_\_

.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

|

.

.

|

.

.

|



\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



"

-

-

|

.

.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

•

•

||

•

•

||

•

•

||

||

•

•

•

•

•

||

•

•

||

•

•

||

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

.

.

.

.

.

|

.

.

|

.

.

|

|

.

.

.

.

.

|

.

.

.

.





.

-

-

|

|

■

"

—

—

|

.

.

|

.

.

■

.

.

|

■

.



■

■

■

|

|

■

■

||

||

-

||

-

||

||

||

||

||

||

||

|



—

—

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■





.

.

■

■

■

■

■

.

.

■

.

.

■

.

.

■

.

.

.

.

.

.

■

■

•

—

•

•

—

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

—

•

—

•

•

—

•

•

—

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-

-



•

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

•

•

•

•

•

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

—

•

—

•

•

—

•

•

—

•

•

—

•

•

•

—

•

•

—

•

"

—

•

"

—

•

•

•

—

•

|

•

•

|

•

•

|

•

•

|

|

"

•

||

"

"

||

"

"

||

.

—

.

.

—

.

.

—

.

.

.

.

.

.

.

.

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

•

•

•

•

—

—

•

•

•

•

—

•

•

—

•

•

—

•

•

•

•

•

•

—

-

-

—

-

-

—

.

.

.

-

.

-

-

-

..

-

—

-

-

—

-

-

—

.

•

—

•

•

•

—

•

•

—

•

•

—

•

•

—

•

•

•

—

•

•

—

•

•



.

.

.

.

.

..

—

.

.

—

.

.

—

.

.

—

.

.

.

—

—

.

.

.

•

—

—

•

•

•

•

•

•

•

•

—

•

•

—

•

•

•

•

•

•

•

•

—

•

•

—

•

•

—

•

•

—

•

•

—

—

—

•

•

—

•

•

•

•

•

•

•

"

—

"

"

—

"

"

"

—

"

"

—

"

"

"

—

—

—

|

"

"

"

"

"

|

.

-

.

-

.

|

.

.

|

.

.

.

|

.

.

|

.

-

.

|

|

.

.

|

|

|

.

.

.

.

.

.

|

.

.

.

.

.

.

|

.

.

.

.

.

.

|

|

.

.

|

.

.

|

.

|

|

|

|

■

—

—

—

—

—

■

—

—

—

—

-

■

-

-

—

—

■

■

-

-

■

-

-

■

.

.

.

.

—

—

.

.



-

-

-

-

-

-

—

-

-

-

-

-

—

.

.

.

-

.

-

-

-

—

-

.

—

-

-

-

—

-

-

—

-

-

-

-

-

||

..

■

-

-

■

■

||

—

■

■

-

-

—

-

—

-

-

—

.

.

.

-

.

-

-

-

—

-

-

—

—

-

-

—

.

-

-

-

-

.

.

-

-

-

-

-

.

-

-

.

.

.

-

.

-

-

-

-

.

.

—

—

.

.

—

.

.

—

.

.

.

—

.

.

.

.

.

.

.

—

—

.

-

-

-

—

—

—

—

■

■

■

■

—

—

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

—

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

"

•

•

■

•

■

•

————

-

■

-

■

-

————

————

■ ■

— —

■

-

-

■

—

—

— —

■



.

—

—

.

.

—

.

—

.

.

.

.

—

.

.

.

.

.

—

.

.

.

.

.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

.

|

.

.

|

-

.

-

.

|

.

.

.

.

.

|

.

-

.

-

.

|

.

.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

11

[illegible]

100%

Page 10 of 10



11

\_\_\_\_\_



1

---

—



1



1



-

■

-

■

■

■

■

■

■

-

-

■

-

-

■

-

-

■

-

-

■

-

■

■

•

—

•

•

—

—

•

•

—

•

—

•

•

—

•

•

—

•

•

—

•

•

—

•

"

"

"

"

"

|

"

"

|

"

"

"

|

"

"

|

"

"

"

|

"

"

|

"



.

|

.

.

|

—

.

.

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

"

"

"

"

"

||

"

-

"

-

"

||

"

"

||

||

"

"

||

"

"

||



•

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

•



|

||

|



•

||

•



•

||

•



||

•

•

|



||

|

.

|

|

.

.

.

|

|

.

.

.

|

.

.

.

.

.

|

.

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

|

.

.

.

.

.

|

.

-

.

-

.

|

.

.

|

.

.

|

.

.

.

.



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

■

|

||

■

—

■

■

—

■

■

■

|

-

■

■

■

-

■

—

■

||

■

—

■

•

—

—

•

•

•

—

•

•

—

•

•

•

•

•

•

•

•

—

•

•

•

—

•

||

■

—

·

■

·

■

·

—

■

||

■

—

·

■

·

■

·

—

■

||

■

■

|



|

|

|

|

■

|

||

■

—

,

■

,

■

,

—

■

”

—

—

,

■

,

■

,

—

•

•

•



—

—

—

|

•

•

•

|

•

•

•

|

•

•

•

|

•

•

•

|

.

.

.

|

|

|

|

|

|

.

.

.

.

|

"

"

"

"

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

■

|||

■

■

■

||

■

■

■

||

■

■

■

||

■

||

||

■

■

————

■

||

————

————

■

||

————

——

■

■

|

■

■

|

■

■

|

■

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

—

•



—

—



•

—

—

—

||



•

•

•

•

—

•

•



"

—

|

||

■

|

||

—

•

"

■

"

|

•

||

—

■

"

—

"

|

"

|

•

"

-

.

"

—

|

|

||

|

||

|

|

||

■

|

||

■

—

.

.

"

.

"

.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

•

•

■

”

•

┆

•

•

■

||

”

”

”

■

■

■

■

┆

■

■

■

||

”

”

"



—

—

—

—

·

·

—

·

"

—

·

"

—

—

·

·

—

·

"

—

·

"



■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■





"

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

"

"

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

"

"

\_\_\_\_\_

"

"

\_\_\_\_\_

"

"

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

"

"

\_\_\_\_\_

"

"

\_\_\_\_\_

"

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

•

•

•

•

•

|

•

•

|

||

"

•

|

•

•

|

•

•

•

|

•

•

•

•



1

□

100



□

■

11

1



1



1

1



||



||



|

•

•

|

"

"

"

||

"

"

||

—

—

—

—

■

—

—

■

"

"

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

.

.

|

||

"

"

||

■

—

—

■

|

.

.

|

||

"

"

|

■

—

—



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

.

.

.

|

.

.

|

.

.

.

|

.

.

|

||

|

.

.

|

.



|  
||  
■  
|  
.  
.  
|  
|  
|  
.  
.  
.  
.  
|  
|  
|  
||  
■  
.  
"  
-  
.  
"  
-

|

||

■

—

•

”

——

•

•

•

•

”

—

—

•

”

——

•

•

•

•

”

—

—

—



.

—

—

—

—





—

■

■

—

■

■

—

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

—

■

■

—

—

•

•

—

—

—

—

—

—

—

•

—

•

—

—

•

•

11

5

1

11

5

1

1

1



1

1

1

1

1



—

·

”

—

|

|

■

·

·

·

—

·

·

”

—

·

”

—

·

”

—

—

·

•

•

\_\_\_\_\_

•

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

•

\_\_\_\_\_

•

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

.

.

|

.

.

|

.

.

|

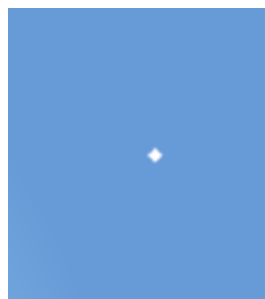
.

"

|

.

.



\_\_\_\_\_

"

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

"

\_\_\_\_\_

•

"

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

•

•

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_





■

■

■

■





■

■

■

■

■

■

■

■



■

■

■

■



■



■

■

■

■

■



■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•











■

■

■

■

■

■











■

■

■

■

■

■

■

■

■



■



■

■

■

■

■

■





## Frente B Módulo 09

No início do século XVI, o astrônomo polonês Nicolau Muitas vezes, é mais conveniente usar o sistema geocêntrico

Copérnico propôs um modelo de sistema planetário simples, de Ptolomeu. Ainda hoje, os procedimentos de navegação

capaz de explicar satisfatoriamente os movimentos dos de barcos e de aviões são baseados nesse modelo.

corpos celestes. Primeiramente, Copérnico considerou que as Contudo, quando lidamos com a análise de forças, isto é,

estrelas estão fixas no céu e que a Terra gira em torno de si. com problemas de Dinâmica, o sistema heliocêntrico de

Por isso, na Terra, temos a alternância do dia com a noite, Copérnico é o mais indicado. além de vermos as estrelas girando em círculos acima de nós.

Além da rotação terrestre, Copérnico também percebeu

o movimento de translação da Terra no espaço. Segundo

seu modelo, a Terra e os outros planetas giram em torno **AS TRÊS LEIS DE KEPLER** do Sol, que é, de fato, o centro do sistema. Copérnico

considerou corretamente que a Lua era um satélite da Terra

e que o sistema Terra-Lua gira em torno do Sol. A

figura 3 **O mapeamento dos céus** mostra o sistema planetário de Copérnico, com a presença dos planetas externos, descobertos posteriormente. O dinamarquês Tycho Brahe nasceu três anos após a

O sistema planetário de Copérnico também permite explicar a morte de Copérnico. Discordando do modelo heliocêntrico do

as trajetórias dos planetas observadas da Terra, inclusive o astrônomo polonês, Brahe propôs um modelo geocêntrico em

movimento peculiar de Marte. que todos os planetas giravam em torno do Sol, enquanto

este girava em torno da Terra. A Lua, mais próxima, também

girava em torno da Terra. Para confirmar a sua teoria, Brahe

Vênus Terra inventou e fabricou  
grandes sextantes e compassos para  
Terra medir os ângulos entre as  
estrelas e os planetas, realizando  
Vênus Marte Marte

de asteroides Cinturão Mercúrio Mercúrio milhares de  
medições referentes às órbitas planetárias  
ao Urano Urano longo de quase quarenta anos.  
As medições de Brahe foram Cinturão Netuno Netuno  
de asteroides Júpiter Saturno Júpiter Saturno feitas com

tanta precisão que até hoje são usadas para  
Sol Sol analisar as órbitas dos planetas  
interiores. Tendo em vista

as condições limitantes de sua época, para muitos,  
Tycho

Brahe foi o maior astrônomo de todos os tempos.

*Figura 3: Sistema planetário de Copérnico. Apesar de ter  
catalogado milhares de informações sobre*

as distâncias planetárias, Tycho Brahe não tinha a  
paciência

O sistema heliocêntrico de Copérnico rebaixou a  
Terra à nem a destreza matemática necessárias para  
analisar aquela

categoria de planeta, retirando-a do centro do  
Universo – avalanche de números. Relutante, ele  
acabou cedendo suas

ideia defendida pela Igreja e muito enraizada entre as  
preciosas tabelas ao alemão Johannes Kepler. Hábil  
matemático,

peessoas. Sabendo das críticas que sofreria, Copérnico Kepler se debruçou sobre os dados e, após anos de árduo

retardou a publicação de sua teoria heliocêntrica (a qual trabalho, conseguiu decifrá-los, exprimindo-os na forma do

apresenta o Sol como o centro do Universo) para o final que hoje conhecemos como as Leis de Kepler. O restante deste

de sua vida. Após a publicação dessa teoria, assistiu-se a módulo é dedicado à apresentação dessas leis. um crescente debate sobre o modelo heliocêntrico. Galileu

foi julgado por defendê-lo e também por divulgar as suas

próprias descobertas científicas. Para evitar uma condenação **Primeira Lei de Kepler – A Lei das** maior, Galileu precisou negar suas convicções publicamente.



Outros seguidores de Copérnico e de Galileu conseguiram, **Órbitas** paulatinamente, implantar o novo paradigma científico.

No início do século XVII, as ideias de Copérnico e de Galileu

foram aceitas pela maioria dos pensadores. Cada planeta gira em torno do Sol em uma órbita

elíptica, com o Sol ocupando um dos focos dela.

Vamos finalizar este tópico com dois comentários

importantes. O primeiro é que, ainda na Idade Antiga,

embora a principal corrente de pensamento fosse baseada A consequência imediata dessa lei é que a distância do

em teorias geocêntricas (a qual apresenta a Terra como o planeta ao Sol é variável ao longo da órbita. Observe esse

centro do Universo), alguns pensadores anteviram o

modelo fato na figura 4, que representa a órbita elíptica de um

de Copérnico. Alguns filósofos gregos defendiam até mesmo planeta em torno do Sol. A posição em que o planeta está

o fato de que a Terra movia-se em torno do Sol. mais próximo do Sol é chamada de periélio, e a posição de

O outro comentário é que, do ponto de vista da Cinemática, máximo afastamento em relação ao Sol é denominada de

não é errado pensar que o Sol gira em torno da Terra, e que afélio. Neste estudo, quando for preciso, denominaremos a

esta está fixa no espaço. Para um observador na Terra, distância do periélio ao Sol pela letra “p”, e a distância do

o planeta está parado, enquanto o Sol e as estrelas giram em afélio ao Sol pela letra “a”. Essas distâncias estão indicadas

sua volta. Isso é semelhante à percepção que um

motorista tem na figura 4. Em geral, o raio orbital médio do planeta é

ao ver o seu carro parado e o solo movendo-se debaixo dele. definido por  $R = (p + a)/2$ .

## 22 Coleção Estudo

■

■



















































■

■

■

■

■

■

■

■















■

■

■

■

■

■

■

■

■

■







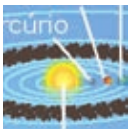
.

■

■

■

■



Leis de Kepler

Órbita elíptica

# Segunda Lei de Kepler – A Lei das

Planeta Áreas



Periélio F F O segmento que liga o Sol ao planeta (raio orbital)  
“varre”  $r_1$  Afélio áreas iguais em tempos iguais.



Sol A consequência imediata dessa lei é que a  
velocidade

■

orbital do planeta varia ao longo da órbita. De acordo  
com

■

P a 2ª Lei de Kepler, se as áreas  $A_1$  e  $A_2$   
mostradas na figura 6  $r_1$  a  $r_2$  são iguais, então  
os intervalos de tempo  $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$ , gastos  $r_1$   $r_2$

em suas varreduras, também são iguais. Como o raio  
orbital

*Figura 4: O planeta se move em uma órbita elíptica, com o Sol médio referente à área A é menor do que o raio orbital médio  $r_1$  em um dos focos. da área A , então a distância percorrida pelo planeta na  $r_2$*

varredura da área A deve ser maior do que aquela referente  $r_1$

A trajetória, na figura 4, está demasiadamente exagerada. à área A . Por isso, a velocidade média do planeta na  $r_2$

À exceção de Mercúrio, que apresenta uma órbita mais varredura da área A é maior do que a velocidade média na  $r_1$  excêntrica, as trajetórias dos outros planetas são quase varredura da área A . Na verdade, o módulo da velocidade  $r_2$  circulares. Para entender o significado da excentricidade do planeta é mínimo quando ele passa pelo afélio, posição

de uma elipse, primeiramente, precisamos saber que a de afastamento máximo do Sol. À medida que o planeta se

soma das distâncias de qualquer ponto da elipse aos focos aproxima do Sol, a sua velocidade aumenta. No periélio,

é constante. De acordo com essa propriedade, podemos posição de menor afastamento do planeta em relação ao Sol,

traçar uma elipse utilizando um cordão preso nos focos o módulo da velocidade do planeta atinge o valor máximo.

F e F da elipse, conforme mostra a figura 5. O cordão  $1$

serve de guia para a ponta de um lápis, de forma que

a soma da distância de F ao ponto P com a distância  $1$

de F ao ponto P é constante (igual ao comprimento do  $2 \Delta t A_{11} A \Delta t_{22}$  barbante), independentemente da posição de P. A elipse Sol traçada é muito excêntrica, porque os focos estão muito **FÍSICA** separados, e os comprimentos dos dois semieixos são bem

diferentes. Para F e F praticamente sobre o centro C,  $A = A t = 1 2 1 2 \Rightarrow \Delta t_1 \Delta_2$  a elipse tende para um círculo. Esse é o caso das trajetórias *Figura 6: A linha que liga o Sol ao planeta descreve áreas iguais*



de quase todos os planetas do Sistema Solar, cujas *em tempos iguais*. excentricidades são pequenas.

# Terceira Lei de Kepler – A Lei dos Período

O quadrado do tempo gasto pelo planeta para percorrer  
sua órbita em torno do Sol é proporcional ao cubo do raio

orbital  
médio.

O tempo necessário para que um planeta complete  
uma

volta em torno do Sol é igual ao seu período orbital  $T$ .

Denominando o raio orbital médio por  $R$ , podemos

P a 3ª Lei de Kepler por meio da seguinte equação:

$$T^2 = K R^3$$

Em que  $K$  é uma constante que possui o mesmo valor para

todos os planetas do Sistema Solar. A consequência dessa

lei é que os planetas mais distantes do Sol possuem menor

Semieixo velocidade orbital. Para provar isso, podemos combinar a

menor equação anterior com a equação da velocidade orbital do

Semieixo planeta,  $v = 2\pi R/T$ . Fazendo isso, obtemos:

maior

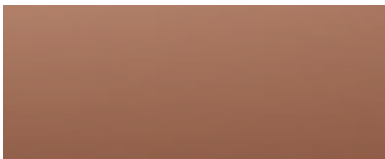
$v \cdot 2 \pi =$

Figura 5: Método prático para traçar uma elipse. KR

.



■



■





■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■



■

■

■

■

■

■

■

■

■

■



■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•



•

•

•

•

•

•

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■



■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 



Frente B Módulo 09

De acordo com essa equação,  $v$  diminui à medida que  $R$

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

aumenta. Isso significa que um planeta muito distante do Sol

leva muito tempo para completar a sua órbita, pois, além de **01**. O cometa Halley é assim chamado em homenagem O módulo da velocidade do planeta ser pequeno, ele ainda a Edmond Halley. Analisando antigos relatos sobre

deve percorrer uma circunferência de grande perímetro para as passagens de uma bola de fogo pelos céus, Halley

dar uma volta em torno do Sol. É por isso que a Terra, que se percebeu que havia uma periodicidade no fenômeno e

encontra relativamente próxima ao Sol, gasta apenas 1 ano que, de fato, tratava-se de um mesmo corpo que aparecia

a cada 75 anos. Esse é o período orbital do cometa.

para completar a sua órbita. No entanto, Netuno, que se

No periélio, a sua distância ao Sol é de 0,59 UA. No afélio,

acha quase 30 vezes mais distante do Sol, gasta 165 anos a órbita do cometa se estende para além da órbita de

para completar a sua órbita. Netuno, e o seu afastamento em relação ao Sol não pode

Vamos, agora, calcular o valor da constante  $K$ , usando ser medido porque nós não podemos vê-lo.

os dados da órbita terrestre. Como você pode imaginar, A) Determinar o ano da próxima aparição do cometa



as distâncias interplanetárias são muito grandes. Por exemplo, Halley, sabendo que a sua última aparição ocorreu

os raios médios das órbitas de Mercúrio, da Terra e de Marte em 1986.

valem 58, 150 e 230 milhões de quilômetros, respectivamente. B) Estimar o afastamento máximo do cometa em relação

Para facilitar a compreensão dessas distâncias, é usual ao Sol utilizando a 3ª Lei de Kepler.

expressá-las em frações ou múltiplos da distância média da *Resolução*:

Terra ao Sol, valor definido como uma unidade astronômica A) A última aparição do cometa ocorreu em 1986.

(1 UA) de comprimento. Assim, a distância média da Terra Somando o período de 75 anos a essa data, obtemos

ao Sol vale simplesmente 1 UA, a de Mercúrio ao Sol vale o ano de 2061 como o da nova aparição. A figura a

0,39 UA, a de Marte ao Sol vale 1,5 UA, e assim por diante seguir mostra a órbita do cometa Halley e algumas

para os outros planetas. Como o período orbital da Terra vale indicações de datas. 1 ano, podemos substituir  $T = 1$  ano e  $R = 1$  UA na equação da

3ª Lei de Kepler e obter o seguinte valor para a constante K:

$$K = \frac{1 \text{ ano}^3}{1 \text{ UA}^3} = \frac{1 \text{ ano}^3}{(1.496 \times 10^8 \text{ km})^3} = 2.95 \times 10^{-24} \text{ s}^2/\text{m}^3$$

Embora as Leis de Kepler tenham sido desenvolvidas

2059 1993 2058

originalmente a partir de órbitas planetárias, elas <sup>18º</sup>

2057 2056 2055 2004 2054 também podem ser aplicadas a

órbitas de cometas e de <sup>2024</sup>

outros corpos que giram em torno do Sol. Na verdade,

Afélio

as Leis de Kepler se aplicam a qualquer corpo que gira

ao redor de um astro central, sendo atraído pelo

campo

**Comentário:** Quando um cometa passa próximo ao

gravitacional deste. Nesse caso, a constante K não será

1 ano /UA<sub>3</sub>, pois esse é o valor referente às órbitas <sub>2</sub> Sol,

ocorre uma forte emissão de luz (a cauda do

cometa) devido aos efeitos da radiação solar sobre o

solares. O importante é termos em mente que a razão

T /R<sub>3</sub> possui o mesmo valor para todos os corpos que

orbitam <sub>2</sub> núcleo do cometa.

em torno de certo astro comum. B) Para calcular o

afastamento máximo do cometa,

primeiramente, vamos determinar o raio orbital médio

Finalizamos aqui a teoria deste módulo. A seguir, de

sua órbita. Utilizando a 3ª Lei de Kepler, temos:

apresentamos uma questão para você refletir e um exercício resolvido referente à órbita do famoso cometa Halley.  $\Rightarrow R = 75,2 \text{ UA}$

Usando uma calculadora, obtemos  $R = 17,8 \text{ UA}$ .

Chamando as distâncias do periélio e do afélio até o

**PARA REFLETIR** Sol de  $p$  e  $a$ , respectivamente, o raio orbital médio

pode ser aproximado por  $R = (p + a)/2$ . Substituindo



Sabendo-se que a Lua gasta 28 dias para



$R = 17,8 \text{ UA}$  e  $p = 0,59 \text{ UA}$  nessa equação, obtemos



completar uma volta em torno da Terra, por que o afastamento máximo do cometa em relação ao Sol.

os períodos orbitais dos satélites artificiais da

Terra são bem menores do que esse valor?  $0,59 + 17,8$   
 $, = \Rightarrow a = 3,5 \text{ UA}$

## 24 Coleção Estudo

### Leis de Kepler

## EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

A constante  $K$  é a mesma para todos os objetos em

órbita em torno do Sol. A velocidade da luz no vácuo é

igual a  $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

**01.** (UERJ) Adotando o Sol como referencial, aponte a Dado:  $10 \approx 3,2$ .

alternativa que condiz com a 1ª Lei de Kepler da A) Considerando-se as distâncias médias, quanto tempo

gravitação universal. leva a luz do Sol para atingir a Terra? E para atingir Plutão?

A) As órbitas planetárias são curvas quaisquer, desde B) Quantos anos terrestres Plutão leva para dar uma

que fechadas. volta em torno do Sol? **EXPRESSE** o resultado de

B) As órbitas planetárias são espiraladas. forma aproximada como um número inteiro.

C) As órbitas planetárias não podem ser circulares.

D) As órbitas planetárias são elípticas, com o Sol

## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

ocupando o centro da elipse.

E) As órbitas planetárias são elípticas, com o Sol

**01.** (UNITAU-SP) Um satélite artificial S descreve uma órbita

ocupando um dos focos da elipse. elíptica em torno da Terra, sendo que a Terra está no foco,

conforme a figura adiante:

**02.** (Unisa-SP) A 2ª Lei de Kepler permite concluir que um

planeta possui B S

A) maior velocidade, quando se encontra mais longe do Sol.

B) maior velocidade, quando se encontra mais perto do Sol. T C A

C) menor velocidade, quando se encontra mais perto do Sol. D

D) velocidade constante em toda sua trajetória. Indique a alternativa **CORRETA**.

E) velocidade areolar variável. A) A velocidade do satélite é sempre constante.

**03.** (UFSM-RS) Dois planetas A e B do Sistema Solar giram caminha ao longo da curva ABC. B) A velocidade do satélite cresce à medida que o satélite

em torno do Sol com períodos de movimento  $T$  e  $T_{AB}$  C) A velocidade no ponto B é máxima.

raios orbitais  $8R$  e  $R$ ,  
respectivamente. Com base nas  
FÍSICA D) A velocidade no ponto D é  
mínima. Leis de Kepler, é **CORRETO**  
afirmar que a razão  $T/T_{AB}$  E) A  
velocidade tangencial do satélite é  
sempre nula. é dada por

A)  $2^1/2$ . C)  $1/8$ . E) 4. **02.** (UERJ) A figura ilustra o movimento de um planeta em

B)  $4^1/2$ . D)  $8^1/8$ . torno do Sol. Se os tempos gastos para o planeta se

**04.** deslocar de A para B, de C para D e de E para F são iguais, (UEM-PR-2007) Dois satélites, A e B, estão em órbitas então as áreas  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  apresentam a seguinte relação:  $A_1 = 2A_2 = 3A_3$  circulares em torno da Terra e a massa de A é maior que

a massa de B. É A) A **CORRETO** afirmar que  $m_1 = m_2 = m_3$  Planeta F  
B)  $A_1 > A_2 = A_3$  A) os períodos de rotação dos satélites são iguais e  $T_1 = T_2 = T_3$   
A E  $A_3$

B) o módulo da velocidade orbital de A é maior que o independente dos raios das órbitas. C)  $A_1 < A_2 < A_3$   
 $A_1$  D)  $A > A > A_{123}$  A módulo da velocidade orbital de B quando os raios  $B_2$  D C das órbitas forem iguais.

**03.** (Unimontes-MG-2007) Um astrônomo registrou as C) as velocidades angulares dos dois satélites são posições A, B e C de um planeta em sua órbita em torno diferentes quando os raios das órbitas forem iguais. do Sol e constatou que as áreas  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , conforme 1 2 3 D) o módulo das velocidades orbitais dos satélites são aparecem na ilustração a seguir, têm o mesmo valor.



iguais para órbitas de mesmo raio. O intervalo de tempo ocorrido entre os registros das

E) a força centrípeta que atua sobre o satélite só depende posições A e B foi de 3 meses terrestres. O “ano” desse

do raio da órbita. planeta corresponde a

**05.** B (Unicamp-SP-2007) Em agosto de 2006, Plutão foi C S reclassificado pela União Astronômica Internacional, 2 S passando a ser considerado um planeta anão. A 3ª Lei 1 S 3 de Kepler diz que  $T^2 = Ka^3$ , em que T é o tempo para um

planeta completar uma volta em torno do Sol, e a é a A

média entre a maior e a menor distância do planeta ao Sol. A) 1 ano terrestre. C) ! do ano terrestre.

No caso da Terra, essa média é  $a = 1,5 \times 10^{11} \text{ m}$ , T

enquanto que, para Plutão, a 11 B) " do ano terrestre. D) 2 anos terrestres. P =  $60 \times 10 \text{ m}$ .

# Frente B Módulo 09

**04.** (UNESP–2008) A órbita de um planeta é elíptica e o **07.** (EFOA-MG) Numa descoberta recente de dois planetas que

Sol ocupa um de seus focos, como ilustrado na figura estão em órbita em torno de uma mesma estrela, distante

(fora de escala). As regiões limitadas pelos contornos do Sistema Solar, constatou-se que os períodos orbitais

OPS e MNS têm áreas iguais a A. destes são  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente. Determine as razões  $\frac{T_1}{T_2}$

dos raios orbitais destes dois planetas, considerando

que, neste sistema planetário, as Leis de Kepler também

Possam ser aplicadas.

$$\frac{A_1}{A_2} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^2 \frac{N_1}{N_2} \left| \frac{r_1}{r_2} \right| \left| \frac{T_1}{T_2} \right| \left| \frac{r_1}{r_2} \right|$$

$$\frac{O_1}{O_2} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^3 \frac{B_1}{B_2} \left| \frac{r_1}{r_2} \right| \left| \frac{T_1}{T_2} \right| \left| \frac{r_1}{r_2} \right|$$

C)  
(.  
)  
T  
 $T_3$   
1 2

Se  $t_3$  e  $t_2$  são os intervalos de tempo gastos para o

$$\frac{O_1}{O_2} = \frac{M_1}{M_2} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \frac{T_1}{T_2}$$



planeta percorrer os trechos OP e MN, respectivamente,  $\frac{1}{2}$

com velocidades médias  $v_1$  e  $v_2$ , pode-se afirmar que  $\frac{t_{OP}}{t_{MN}} = \frac{v_2}{v_1}$

A)  $t_{OP} > t_{MN}$  e  $v_1 < v_2$ . B)  $t_{OP} = t_{MN}$  e  $v_1 > v_2$ . C)  $t_{OP} < t_{MN}$  e  $v_1 > v_2$ . D)  $t_{OP} < t_{MN}$  e  $v_1 < v_2$ . E)  $t_{OP} > t_{MN}$  e  $v_1 < v_2$ .

B)  $t_{OP} = t_{MN}$  e  $v_1 > v_2$ .

08. (FUVEST-SP) Considere um satélite artificial em órbita

D) circular. Duplicando a massa do satélite sem alterar o raio da órbita, o período de revolução, o raio da órbita será

E)  $t_{OP} < t_{MN}$  e  $v_1 < v_2$ . A) duplicado. seu período de revolução, o raio da órbita será

B)

quadruplicado.

05. (Mackenzie-SP) Dois satélites de um planeta têm períodos de revolução de 32 dias e de 256 dias, respectivamente. D) reduzido à quarta parte.

de revolução de 32 dias e de 256 dias, respectivamente. D) reduzido à quarta parte.

Se o raio da órbita do primeiro satélite vale 1 unidade, E) o mesmo. então o raio da órbita do segundo será

09. (UECE) Se R é o raio médio da órbita de um planeta X, e T

A) 4 unidades.

é o período de revolução em torno do Sol, a 3ª Lei

B) 8 unidades. de Kepler estabelece que  $T_2 = C.R_3$ , em que C é uma

C) 16 unidades. constante de proporcionalidade, válida para todos os

planetas de nosso Sistema Solar. Suponha que a distância

D) 64 unidades.

média do planeta X ao Sol é 4 vezes a distância média da

E) 128 unidades.

Terra ao Sol. Podemos concluir que o período do planeta

X  
é,  
em  
anos,

**06.** (Cesgranrio) O raio médio da órbita de Marte em torno A) 2. C) 8.

do Sol é aproximadamente quatro vezes maior do que o B) 4. D) 16.

raio médio da órbita de Mercúrio em torno do Sol. Assim,

a razão entre os períodos de revolução, T **10.**

(UDESC-2008) O raio da órbita de Urano em torno do Sol  $r_1$  e  $T_2$ , de Marte

e de Mercúrio, respectivamente, vale, aproximadamente, é  $2,90 \times 10^{12}$  m. Considerando o raio de órbita da Terra

$1,50 \times 10^{11}$  m, o período de revolução de Urano em torno

A) T do Sol, expresso em anos terrestres, é de  $r_1 / T_2 = 1/4$ .

B) T A) 85,0 anos.  $r_1 / T_2 = 1/2$ .

C) T / T =  $2. r_1 r_2$  C) 19,3 anos. B) 1,93 anos.

D)  $T_1/T_2 = 4$ . D) 1,50 anos.

E)  $T_1/T_2 = 8$ . E) 150 anos.

## 26 Coleção Estudo

# Leis de Kepler

**11.** (UNIFAP–2006) Analise as assertivas a seguir: I

I. O cubo do período orbital de qualquer planeta é  
proporcional ao quadrado do semieixo maior da órbita

Sol

elíptica ao redor do Sol. A P

II. O raio vetor traçado do Sol até qualquer planeta

descreve áreas iguais em intervalos de tempo iguais. V Planeta

III. Todo planeta, no Sistema Solar, descreve uma órbita

A) Em que ponto da trajetória a velocidade do planeta  
elíptica com o Sol no centro da elipse.

é máxima? Em que ponto essa velocidade é mínima?

IV. A 3ª Lei de Kepler afirma que a força gravitacional **JUSTIFIQUE**  
sua resposta.

de repulsão entre duas partículas quaisquer varia B) Segundo Kepler, a  
linha que liga o planeta ao Sol

com o inverso do quadrado da distância entre essas percorre áreas  
iguais em tempos iguais. **COLOQUE** partículas. em ordem crescente os  
tempos necessários para

realizar os seguintes percursos: VPI, PIA, IAV, AVP.

Qual(is) a(s) assertiva(s) **INCORRETA(S)**?

A) Apenas IV

B) Apenas II

## SEÇÃO ENEM

C) Apenas I, III, IV

D) Apenas II, III, IV **01.** (Enem–2009) Na linha de uma tradição antiga,

E) I, II, III, IV o astrônomo grego Ptolomeu (100-170 d.C.) afirmou a tese do geocentrismo, segundo a qual a Terra seria o

**12.** (IME-RJ–2010) Três satélites orbitam ao redor da Terra: girariam em seu redor em órbitas circulares. A teoria **FÍSICA** centro do Universo, sendo que o Sol, a Lua e os planetas

o satélite S em órbita elíptica com o semieixo maior  $a_1$  de Ptolomeu resolvia de modo razoável os problemas

e o semieixo menor  $b_1$ ; o satélite S<sub>2</sub> em outra órbita astronômicos da sua época. Vários séculos mais tarde,

elíptica com semieixo maior  $a$  e semieixo menor  $b$ ; o clérigo e astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473- 2 2

e o satélite S 1543), ao encontrar inexatidões na teoria de Ptolomeu, 3 em uma órbita circular com raio  $r$ .

Considerando que  $r = a_1 = b_2$ ,  $a_1 \neq b_1$  e  $a_2 \neq b_2$ , é Sol deveria ser

considerado o centro do Universo, com a formulou a teoria do heliocentrismo, segundo a qual o

**CORRETO** afirmar que

Terra, a Lua e os planetas girando circularmente em torno

A) os períodos de revolução dos três satélites são iguais. dele. Por fim, o astrônomo e matemático alemão Johannes

Kepler (1571-1630), depois de estudar o planeta Marte por

B) os períodos de revolução dos três satélites são

cerca de trinta anos, verificou que a sua órbita é elíptica.

diferentes. Esse resultado generalizou-se para os demais planetas.

C)  $S_1$  e  $S_3$  têm períodos de revolução idênticos, maiores A respeito dos estudiosos citados no texto, é correto

do que o de  $S_2$  afirmar que

D) S A) Ptolomeu apresentou as ideias mais valiosas, por e S têm períodos de revolução idênticos, menores  $S_1$   $S_3$

do que o de S serem mais antigas e tradicionais.  $S_2$  .

E) S e S têm períodos de revolução idênticos, maiores  $S_2$   $S_3$  inspirado no contexto político do Rei Sol. B) Copérnico desenvolveu a teoria do heliocentrismo

do que o de  $S_1$ .

C) Copérnico viveu em uma época em que a pesquisa

científica era livre e amplamente incentivada pelas

**13.** (Unicamp-SP) A figura a seguir representa exageradamente autoridades.

a trajetória de um planeta em torno do Sol. O sentido do D) Kepler estudou o planeta Marte para atender às

percurso é indicado pela seta. O ponto V marca o início do

necessidades de expansão econômica e científica da

verão no Hemisfério Sul e o ponto I marca o início do inverno. Alemanha.

O ponto P indica a maior aproximação do planeta ao Sol, E) Kepler apresentou uma teoria científica que,

o ponto A marca o maior afastamento. Os pontos V, I e o graças aos métodos aplicados, pôde ser testada e

Sol são colineares, bem como os pontos P, A e o Sol. generalizada.

Editora Bernoulli 27

## Frente B Módulo 09

**02.** (Enem–2001) O texto foi extraído da peça *Tróilo e*

*Créssida*, de William Shakespeare, escrita, provavelmente,

## GABARITO

em 1601.

*Os próprios céus, os planetas, e este centro*

*reconhecem graus, prioridade, classe,* **Fixação**

*constância, marcha, distância, estação, forma,*

*função e regularidade, sempre iguais;* 01. E

*eis porque o glorioso astro Sol* 02. B

*está em nobre eminência entronizado*

03.  
D

*e centralizado no meio dos outros,*

*e o seu olhar benfazejo corrige* 04. D

*os maus aspectos dos planetas malfazejos,* 2 05. A)  $t_T = 5,0 \times 10^8$  s e  $t_P = 2,0 \times 10^4$  s e, *qual rei que comanda, ordena*

*sem entraves aos bons e aos maus.* B) 256 anos

(Personagem Ulysses, Ato I, cena III). SHAKESPEARE, W.

*Tróilo e Créssida*. Porto: Lello & Irmão, 1948. **Propostos**

A descrição feita pelo dramaturgo renascentista inglês

se aproxima da teoria 01. B

A) geocêntrica do grego Claudius Ptolomeu.

02.  
A

B) da reflexão da luz do árabe Alhazen.

C) heliocêntrica do polonês Nicolau Copérnico. 03. C

D) da rotação terrestre do italiano Galileu Galilei. 04. B

E) da Gravitação Universal do inglês Isaac Newton.

05.  
A

**03.** (Enem–2000) A tabela a seguir resume alguns dados 06. E

importantes sobre os satélites de Júpiter.

07.  
A

**Nome Distância Período média ao 08. E orbital Diâmetro  
centro de (dias Júpiter 09. C terrestres) (Km)**

10.

A

Io 3 642 421 800 1,8

Europa 11. C 3 138 670 900 3,6

Ganimedes 5 262 1 070 000 7,2 12. D

Calisto 4 800 1 880 000 16,7

13. A) Segundo a Lei das Áreas de Kepler, num

Ao observar os satélites de Júpiter pela primeira vez, intervalo de tempo fixo  $\Delta t$ , a linha que une

Galileu Galilei fez diversas anotações e tirou importantes o planeta ao Sol percorre a mesma área.

conclusões sobre a estrutura de nosso Universo. A figura O deslocamento, nesse intervalo de tempo,

a seguir reproduz uma anotação de Galileu referente a é máximo próximo a P e mínimo próximo

Júpiter e seus satélites. a A. Logo, a velocidade é máxima em P e

1 2 3 4 mínima em A.



B)  $\Delta t \text{ (VPI)} < \Delta t \text{ (PIA)} = \Delta t \text{ (AVP)} < \Delta t \text{ (IAV)}$



De acordo com essa representação e com os dados da

tabela, os pontos indicados por 1, 2, 3 e 4 correspondem,



# Seção Enem

respectivamente, a

A) Io, Europa, Ganimedes e Calisto. 01. E

B) Ganimedes, Io, Europa e Calisto.

C) Europa, Calisto, Ganimedes e Io. 02. C

D) Calisto, Ganimedes, Io e Europa. 03. B

E) Calisto, Io, Europa e Ganimedes.

## 28 Coleção Estudo

### FÍSICA MÓDULO FRENTE

## Lei da Gravitação Universal 10 B

As Leis de Kepler, introduzidas no início do século XVII, Se a força atrativa exercida pelo Sol sobre a Terra fosse

representaram um passo fundamental na compreensão do muito pequena, a Terra tenderia a seguir uma trajetória em

movimento dos planetas. Contudo, sendo empíricas, essas linha reta. Se essa força fosse demasiadamente grande,

dar o gigantesco passo de elaborar a Teoria da Gravitação sabia que a órbita da Terra, além de estável, era quase circular. Universal. Usando essa teoria, Newton conseguiu não. Então, ele concluiu que a força de atração exercida pelo Sol não constitui uma teoria. Coube a Isaac Newton a Terra se aproximaria do Sol até “cair” sobre ele. Newton

dos planetas, como também pôde aplicá-la ao sistema sobre a Terra fazia o papel de força centrípeta, necessária somente demonstrar as Leis de Kepler sobre o movimento

Terra-Lua e ao movimento das marés oceânicas. Neste para o planeta se manter continuamente em órbita. Então,

módulo, estudaremos a Lei da Gravitação Universal e aplicando a 2ª lei do movimento, Newton escreveu:

algumas de suas aplicações.  $F = ma_c$

Iniciaremos o módulo apresentando o raciocínio usado

por Newton para obter a expressão matemática da Lei da Em que  $m$  é a massa da Terra, e  $a$  é a sua aceleração  $c$ .

Gravitação Universal. Em seguida, vamos utilizar essa lei centrípeta. Essa aceleração é dada por  $a = \frac{v^2}{R}$ , expressão  $c$ .

para calcular a aceleração da gravidade em um planeta e bem conhecida na época de Newton, em que  $v$  e  $R$  são a para calcular a velocidade orbital de

planetas e satélites. velocidade angular e o raio orbital do movimento da Terra

Além disso, mostraremos que, a partir da Lei da Gravitação em torno do Sol, respectivamente. Para aparecer o período

Universal, podemos deduzir as três Leis de Kepler. Uma orbital  $T$  na equação anterior, Newton substituiu  $w$  por  $2\pi/T$

fechará a teoria deste módulo.  $2 \ 4 \ \pi \ R \ F \ m =$  leitura complementar sobre a órbita de estrelas binárias e obteve:

.  $2 \ T$

**A DEDUÇÃO DA LEI DA** Em seguida, para eliminar o período  $T$ , de forma a obter

**GRAVITAÇÃO UNIVERSAL** uma expressão de  $F$  em função apenas de  $m$  e  $R$ , Newton

usou a 3ª Lei de Kepler:  $T_2 = KR_3$ , em que  $K$  é a constante

Isaac Newton havia concluído sua teoria sobre as referente às órbitas planetárias, cujo valor é igual a três leis do movimento quando começou a refletir mais 1 ano<sub>2</sub>/UA<sub>3</sub>. Newton substituiu essa expressão na equação profundamente sobre o tipo de força que a

Terra deveria da força exercida pelo Sol sobre a Terra e obteve: exercer sobre a Lua para mantê-la em órbita. Segundo

reflexão: Quem sabe, a força que a Terra exerce sobre  
 $F = K_s R$  dizem, ao ver uma maçã cair, Newton teria  
feito a seguinte  $m_2$

a Lua possui a mesma natureza que a força de atração  $_2$   
Em que  $K = 4 \pi / K$  é uma constante referente ao Sol,  
pois a gravitacional da Terra sobre a maçã? Mais do  
que isso,  $_s$  constante  $K$  corresponde às órbitas  
planetárias. Nesse ponto, Newton imaginou que uma  
interação atrativa desse tipo poderia acontecer mesmo  
entre o Sol e a Terra, conforme Newton voltou à  
pergunta inicial: Qual seria a natureza da

ilustra a figura a seguir: força de atração exercida pelo  
Sol sobre os corpos ou, ainda,

que propriedade do Sol determinaria o valor da  
constante  $K$  ?  $_s$  Uma vez que a atração gravitacional  
ocorria com todos os

$M$  corpos, Newton imaginou que a própria matéria  
seria a  
propriedade dos corpos que lhes conferia a capacidade  
de

$R$  atraírem uns aos outros. Então, ele postulou que  $K$   
fosse  $_s$

proporcional à massa  $M$  do Sol, de forma que  $K =$

$G.M, s$

F em que G é uma constante de proporcionalidade.

Assim,

Newton chegou à seguinte expressão para calcular a  
força

m de atração exercida pelo Sol  
sobre a Terra:

Figura 1: Newton percebeu que uma força de atração exercida  $F_{GM} = \frac{G M m}{r^2}$

R

pelo Sol sobre a Terra mantém a órbita desse planeta.

Editora Bernoulli 29

## Frente B Módulo 10

Newton sabia que, de acordo com a Lei da Ação e Reação, se o Sol atrai a Terra, então esta também deve atrair o Sol. Além disso, o mesmo deveria acontecer com

outros sistemas, como a Terra e a Lua, o Sol e Júpiter, etc.  $F_{21} r = 1,0 \text{ m}$   $F_{12}$  Newton generalizou essa ideia, afirmando que qualquer par

de corpos, de massas  $m_1$  e  $m_2$ , separados pela distância  $r$ ,

se atraem gravitacionalmente com uma força dada por:  $P_1$



$F_g \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}$  Figura 2: A atração gravitacional entre os lutadores é desprezível,  $\frac{m_1}{M} \approx \frac{m_2}{M} \approx 0$  mas a atração gravitacional da Terra sobre eles não é.

Inicialmente, vamos calcular o módulo da força

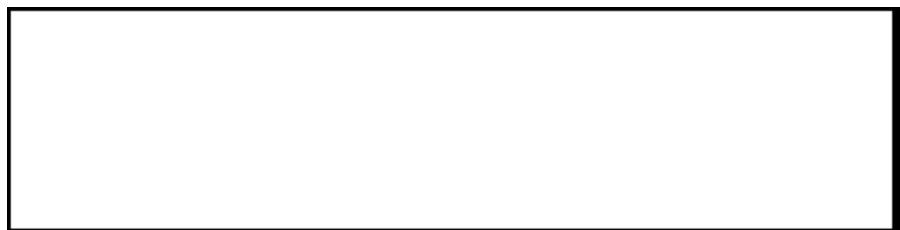
Essa é a equação da Lei da Gravitação Universal. gravitacional  $F$  que o lutador mais leve exerce sobre

O 12

Em palavras, essa lei pode ser assim expressa: lutador mais pesado. Para isso, precisamos usar a equação da

Lei da Gravitação Universal. Substituindo as massas dos dois

homens e a distância entre eles nessa equação e aproximando



a constante gravitacional para  $G \approx 10^{-10} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ , obtemos:



Matéria atrai matéria na razão direta do produto



de suas massas e na razão inversa do quadrado da m  
m  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 10^{-10} \frac{100 \cdot 200}{10^2} = 0,000002 \text{ N}$  distância entre  
elas.  $10^{-10} \frac{100 \cdot 200}{10^2} = 0,000002 \text{ N}$

Essa força é tão pequena que não faz o menor sentido

A constante  $G$ , que aparece na Lei da Gravitação  
considerá-la em problemas sobre a dinâmica dos  
lutadores.

Universal de Newton, é uma constante universal. Ela  
não De acordo com a Lei da Ação e Reação, o módulo  
da força  $F_{21}$

depende do tipo de matéria dos corpos e nem do local  
onde que o lutador mais pesado exerce sobre o lutador  
mais leve

eles se encontram. Por isso,  $G$  é denominada de  
constante tem a mesma intensidade da força  $F$ .<sup>12</sup>

da gravitação universal. Newton tinha somente uma  
ideia Agora, vamos calcular a força de atração  
gravitacional

do seu valor. Apenas muito tempo depois das  
descobertas que a Terra exerce sobre o lutador mais  
pesado. Cada um

de Newton é que o valor de  $G$  foi obtido com razoável  
dos incontáveis pedaços de matéria da Terra,  
distribuídos

precisão (veja o Exercício Resolvido 01). No Sistema a  
diferentes distâncias do centro desta, atrai o homem



Internacional de Unidades, o valor dessa constante é: com uma pequena força. Admitindo uma distribuição

esfericamente simétrica e homogênea da massa da Terra,

é possível provar que a soma vetorial de todas essas forças

$Nm^2$

$G_{-11}$  possui o mesmo módulo, a mesma direção e o mesmo  $= 6,67 \times 10$

$kg_2$  sentido da força que a Terra exerceria sobre o lutador caso a

massa da Terra estivesse concentrada em seu centro. Assim,

Em que a unidade  $Nm$  para calcular a força total que a Terra exerce sobre o lutador,  $_2/kg_2$  garante a consistência

dimensional da equação da Lei da Gravitação Universal. que nada mais é do que o peso dele, devemos substituir, na

(relativo ao produto  $m M = 10^{25} kg$ , a massa do lutador  $m = 200 kg$  e a distância  $.m$ ) e dividindo o resultado  $_{TL12}$  entre o centro da Terra e o lutador, que é o raio da Terra, por  $m$  Observe que, multiplicando a unidade da constante  $G$  por  $kg$  equação da Lei da Gravitação Universal, a massa da Terra  $_2$

$_{22}$  (relativo à razão  $1/r$ ), obtemos o newton (N), que

R =  
 $10^7 \text{ m}$ .  
 O  
 resultado  
 é:

é a unidade de força no Sistema Internacional.

a força gravitacional assume valores apreciáveis apenas Note que o valor da constante G é muito pequeno. Por isso,  $10^{-10} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$   $P = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 10^{-10} = 2,0 \times 10^{-10} \text{ N}$

quando pelo menos uma das massas é muito grande.

Para comprovar isso, vamos fazer dois cálculos com a  $2$  Podemos, ainda, calcular o peso do lutador por meio da equação da Lei da Gravitação Universal, o primeiro para equação  $P = m \cdot g$ , em que  $g = 10 \text{ m/s}^2$  é a aceleração da  $1$

gravidade na superfície da Terra. Substituindo  $m = 200 \text{ kg}$

calcular a força de atração entre duas pessoas próximas e o nessa equação, obtemos o mesmo resultado anterior. Nesse

outro para calcular o peso de uma delas. Observe a figura 2, cálculo,  $m$  é a massa inercial do lutador. No cálculo de  $P$ ,  $1$  que mostra dois lutadores de sumô, um mais leve, de massa utilizando a Lei da Gravitação,  $m$  é a massa gravitacional do  $1$   $m = 100 \text{ kg}$ , e o outro mais pesado, de massa  $m = 200 \text{ kg}$ ,  $2$  lutador. Como os dois resultados são idênticos,

concluimos

separados pela distância  $r = 1,0$  m. que a massa inercial e a massa gravitacional são iguais.

## 30 Coleção Estudo

# Lei da Gravitação Universal

**EXERCÍCIO RESOLVIDO** Finalmente, substituindo essa força na equação inicial,

obtemos a constante  $G$ :

**01.**  $6,0 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$  Em 1798, o inglês Henry Cavendish determinou o  $G = 6,0 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$

$5,0 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$

valor da constante da gravitação universal  $G$  por meio

de uma balança de torção, como aquela representada

**Comentário:**

na figura a seguir. Nessa balança, duas pequenas massas ( $m$ ) são presas às extremidades de uma O resultado anterior apresenta um desvio de

haste suspensa por um fio. Duas massas maiores ( $M$ )

$0,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$  e um erro de 10% em relação

atraem as massas menores, causando uma torção no ao valor preciso de  $G$ , que é  $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ .

fio. Considere que a haste dessa montagem tenha A dificuldade em obter o valor de  $G$  com precisão deve-se

um comprimento  $L = 2,0 \text{ m}$  e que o fio obedeça à pequena intensidade da força gravitacional entre

à Lei de Hooke rotacional  $M$  massas ordinárias. Cavendish iniciou seus experimentos  $= k \theta$ , em que  $M$  é o  $\circ \circ \circ$  em 1797 e levou dois anos modificando a balança momento de força aplicado na haste e  $\theta$  é o ângulo

de torção do fio. A constante de torção do fio é de torção, até ela produzir resultados confiáveis.

$k = 2,0 \times 10$  Uma das modificações feitas consistiu em realizar a  $-8 \text{ N.m/gra}^\circ$ . Considere ainda que as

massas sejam  $m = 2,0 \text{ kg}$  e  $M = 5,0 \text{ kg}$ . medição do ângulo de torção com o auxílio do sistema

óptico mostrado na figura deste exercício.

$M \ m$  APLICAÇÕES DA LEI DA

Fonte de Luz GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

# Aceleração da gravidade

**m FÍSICA** Imagine uma pedra caindo de um ponto muito alto em

uma direção à superfície da Terra. Considere que a altitude da pedra em relação à superfície da Terra seja  $h$ , conforme

Determinar o valor da constante da gravitação mostra a figura 3. A massa da pedra é  $m$ , e a massa e o raio da Terra são  $M$  e  $R$ , respectivamente. universal para os seguintes dados:  $\theta = 6,0^\circ$  e  $r = 10 \text{ cm}$

(separação entre as massas  $m$  e  $M$ ).

Pedra ( $m$ )

## **Resolução:**

O valor da constante da gravitação universal pode ser calculado por:

$$G \frac{Mm}{r^2} = \frac{Mm}{R^2}$$

Em que  $F$  é o módulo da força de atração gravitacional

entre as massas  $M$  e  $m$ . Nessa equação, conhecemos os valores de  $M$ ,  $m$  e  $r$ . Para calcular o valor de  $F$ , vamos

usar a equação  $M = F.L/2 + F.L/2 = FL$ , que representa o

o momento do binário de forças sobre a haste. Nessa equação, sabemos o valor de  $L$ , o comprimento da

ser calculado por meio da Lei de Hooke  $M$  *Figura 3: O peso da pedra diminui com o aumento da altura em*  $= k \theta$ . *a relação à superfície da Terra; logo, o módulo da aceleração da* haste. O momento  $M$  que atua sobre a haste pode o

Substituindo os valores dados de  $k$  e  $\theta$ , obtemos:

*gravidade também diminui com o aumento da altura.*

$$M = 2,0 \times 10^{-8} \cdot 6,0 = 12 \times 10^{-8} \text{ N.m}$$

Substituindo esse momento na expressão  $M = FL$ , Agora, vamos calcular a intensidade do peso da pedra

obtemos a força de atração gravitacional: em utilizar a equação  $P = mg$ , que aprendemos de duas maneiras. A primeira consiste simplesmente

$$12 \times 10^{-8} = F \cdot 2,0 \Rightarrow F = 6,0 \times 10^{-8} \text{ N}$$

no estudo das Leis de Newton para o movimento.

## Frente B Módulo 10

A outra maneira consiste em calcular a força de atração. Como  $GM/R^2$  é a aceleração da gravidade na superfície

gravitacional que a Terra exerce sobre a pedra por meio da do planeta, concluímos que a aceleração a uma altitude

equação da Lei da Gravitação Universal. Nessa equação, equivalente ao raio do planeta vale  $1/4$  da aceleração da

$m$  representa a massa  $M$  da Terra,  $m$  é a massa  $m$  da pedra, gravidade na superfície do planeta. O gráfico da figura 4<sub>12</sub>

e  $r$  é a distância entre a pedra e o centro da Terra. É fácil ilustra a diminuição da aceleração da gravidade  $g$  em função

ver que  $r$  é igual à altitude  $h$  somada à distância do ponto de da distância  $r$  ao centro do planeta Terra. Observe que a

impacto da pedra no solo até o centro da Terra, que é o raio  $R$  aceleração da gravidade é máxima na superfície da Terra e

desta. Matematicamente,  $P = GMm/(R + h)^2$ . Igualando as que ela diminui na razão inversa de  $r^2$ , quando nos afastamos

duas equações que obtivemos anteriormente para o peso da do planeta, e na razão direta de  $r$ , quando afundamos na

pedra e cancelando a massa da pedra que aparece em ambas Terra. Essa aproximação linear é válida se admitirmos uma

as equações, obtemos a seguinte expressão para a aceleração densidade constante para a Terra, conforme discutiremos no

da gravidade na Terra (ou em qualquer outro astro):  
Exercício Resolvido 02.

$$P = GMm \quad g(\text{m/s}^2) \quad GM \quad mg = = \Rightarrow g = \frac{GM}{(R+h)^2} \quad (R+h)$$

Observe que, sendo  $h = 0$  nessa equação, obtemos a equação  $g = GM/R_2$ , que fornece o módulo da aceleração

da gravidade na superfície da Terra. Newton utilizou o valor

de  $9,8 \text{ m/s}^2$  para  $g$  e de  $6,4 \times 10^6 \text{ m}$  para o raio da Terra

(valores bem conhecidos naquela época), conseguindo determinar o produto  $GM$ . Em seguida, Newton estimou a

massa da Terra, supondo uma densidade cinco vezes maior 2,5 do que a da água e multiplicando esse valor



pelo volume do

planeta ( $V = 4\pi R^3 / 3$ ). Assim, Newton calculou, grosseiramente,

o valor da constante da gravitação universal  $G$ . Muito tempo depois,

Cavendish obteve o valor de  $G$  com maior precisão.

(veja o Exercício Resolvido 01) e pôde, assim, calcular com maior exatidão a massa da Terra, obtendo o valor de *distância ao centro do planeta*. *Figura 4: Aceleração da gravidade da Terra em função da distância ao centro*. Por isso, Cavendish é conhecido como aquele

que primeiro conseguiu “pesar” a Terra. A última conclusão importante que podemos tirar da equação

$$g = GM/R^2$$

é que a aceleração da gravidade na superfície da

Analizando a equação da aceleração da gravidade, podemos

Terra não é exatamente constante, pois a Terra não é uma

tirar três conclusões importantes. A primeira é que  $g$  não

esfera perfeita. O valor médio da aceleração da gravidade

depende da massa  $m$  do corpo imerso no campo gravitacional

na superfície da Terra é  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Porém, devido ao do planeta, pois, como vimos, essa massa é cancelada no

achatamento do planeta, o raio polar é um pouco menor que

cálculo de  $g$ . Entretanto, a aceleração da gravidade depende

o raio equatorial. O resultado disso é que, em geral, pontos

da massa  $M$  do planeta. Na superfície,  $g$  é diretamente

na superfície terrestre próximos aos polos apresentam proporcional à massa do planeta e inversamente proporcional

aceleração da gravidade um pouco maior do que aquela

ao quadrado do raio do planeta. Isso significa que planetas

de pontos próximos ao Equador. Além disso, cidades mais

mais densos apresentam aceleração da gravidade maior do

elevadas tendem a ter valores de aceleração da gravidade

que planetas de menor densidade, considerando que ambos

menores. Na verdade, o achatamento da Terra é discreto,

tenham o mesmo raio.

e a altura das montanhas mais elevadas é pequena em

Outra conclusão que podemos tirar da equação da comparação ao raio da Terra. Assim, a variação da aceleração

aceleração da gravidade diz respeito ao significativo da gravidade sobre a superfície terrestre é pequena.

decréscimo de  $g$  em função da distância à superfície do Por exemplo, em Belo Horizonte, cidade relativamente

planeta. Por exemplo, para  $h = R$ , temos: próxima ao Equador (latitude:  $20^\circ$  sul) e a cerca de 800 m

acima do nível do mar, a aceleração da gravidade vale

$g \approx 9,78 \text{ m/s}^2$ . Esse valor difere apenas 0,31% do valor médio  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ . Esse valor difere apenas 0,31% do valor médio  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$  da aceleração da gravidade na superfície do planeta.

**Velocidade orbital** corpo orbitante. De acordo com a equação anterior, quanto

mais distante do astro central, menor será a  
velocidade

A figura 5 mostra dois corpos em órbitas estáveis em torno relativa do corpo em órbita estável. Dessa forma, o módulo

do Sol. Um deles é a Terra, e o outro, uma nave espacial. da velocidade orbital da nave da figura 5 é maior do que o

Qual deve ser o módulo da velocidade de cada um dos corpos módulo da velocidade orbital da Terra, pois a distância da

para que eles se mantenham em órbitas estáveis em torno nave ao Sol é menor do que a distância da Terra ao Sol.

do Sol? O módulo dessa velocidade depende apenas da Se os motores da nave forem acionados, de forma que ela

massa do Sol e da distância entre este e o corpo orbitante. seja deslocada para uma órbita mais distante do Sol do que

A seguir, aplicando a Lei da Gravitação Universal, vamos a órbita terrestre, então o módulo da velocidade orbital da

demonstrar essa afirmativa. nave deverá ser menor do que o da Terra, para que a nave

se mantenha em uma órbita estável. Usando esse raciocínio, concluímos que os planetas mais longínquos, como Urano e Netuno, são mais lentos, enquanto os planetas próximos ao Sol, como Mercúrio e Vênus, são mais velozes.

Podemos estender a dedução da equação anterior para qualquer corpo que esteja orbitando em torno de outro. Para



isso, devemos considerar que  $M$  é sempre a massa do astro central. Por exemplo, para calcularmos a velocidade orbital da Lua em torno da Terra, basta igualar  $M$  à massa da Terra e  $r$  à distância Terra-Lua. Júpiter possui quatro satélites naturais. A velocidade orbital de cada um deles é dada pela equação anterior, sendo  $M$  igual à massa

de

Júpiter e  $r$  igual à distância do satélite em questão até o

centro  
de  
Júpiter.

*Figura 5: As órbitas estáveis da Terra e da nave ocorrem com*

## FÍSICA



*velocidades bem definidas.*



De acordo com a 1ª Lei de Kepler, as órbitas descritas



pela Terra e pela nave são elípticas. Contudo, é

## razoável PARA REFLETIR



considerar os movimentos da Terra e da nave em torno Apesar de estar mais distante da Terra, por que



do Sol como circulares e com velocidades constantes, é bem mais fácil determinar a massa de Júpiter



em módulo. Nesse caso, a força de atração gravitacional do que a massa da nossa Lua?



exercida pelo Sol sobre o corpo em órbita exerce o papel

de força centrípeta. Então, podemos calcular o módulo

dessa força tanto por meio da equação da força

centrípeta, **As Leis de Kepler**  $F = mv^2/r$ , quanto por meio da equação da força de atração  $c$

gravitacional exercida pelo Sol sobre o corpo orbitante, cujo A partir da equação da Lei da Gravitação Universal e

valor é dado pela Lei da Gravitação Universal,  $F = GMm/r$  das leis do movimento, Newton conseguiu demonstrar as 2 .

Nessas equações,  $v$  e  $m$  são a velocidade e a massa do corpo três Leis de Kepler. A dedução da 3ª Lei é a mais simples

em órbita, respectivamente, enquanto  $M$  é a massa do Sol, das três. Na verdade, Newton chegou à Lei da Gravitação

e  $r$  é a distância do corpo orbitante ao Sol. Igualando essas Universal usando, em parte, a 3ª Lei de Kepler, conforme

equações, obtemos a seguinte expressão para a velocidade  $v$ : vimos no início deste módulo. De forma inversa, podemos

deduzir a 3ª Lei de Kepler igualando a força centrípeta

$mv^2/r$  à força de atração gravitacional e  
utilizando  $v = 2\pi r/T$   $GMm/r^2 = mv^2/r \Rightarrow v^2 = \frac{GM}{r}$

$r$  ( $T$  é o período orbital) nessa igualdade. O resultado obtido

é  
mostrado  
a  
seguir:

corpo orbitante, que foi cancelada na dedução da



equação. Observe que a velocidade orbital não depende da massa do astro central, como o Sol, depende da massa do astro central e da distância entre os centros desse astro e do corpo em órbita estável em

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

torno de um astro central, como o Sol, depende da massa do astro central e da distância entre os centros desse astro e do corpo em órbita estável em

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

Editora Bernoulli 33

## Frente B Módulo 10

Essa expressão é a 3ª Lei de Kepler, e o quociente  $4\pi^2/GM$  A figura 7 mostra a órbita circular de um satélite terrestre

representa a constante  $K = 1 \text{ ano}^2/\text{UA}^3$  dessa lei. girando no plano do Trópico de Câncer da Terra. Observe

Como esperado, K depende apenas do Sol, mais que o centro de força (centro da Terra) e o centro da órbita especificamente, da sua massa. A utilização dos valores não coincidem. Por isso, essa órbita não é estável. Embora a

de K e G nessa equação permitiu que o valor da massa do componente radial F da força de atração exercida pela Terra

Sol,  $2,0 \times 10$  sobre o satélite exerça o papel da força centrípeta, necessária  $_{30}$  kg, fosse calculado no final do século XVIII.

para manter o satélite em movimento circular, a  
componente  $F_y$

De maneira semelhante à equação da velocidade orbital, puxa o satélite para baixo, desestabilizando sua órbita.

a equação da 3ª Lei de Kepler também pode ser estendida Podemos propor infinitas órbitas circulares estáveis em torno

a outros sistemas orbitais, por exemplo, a Terra e a Lua ou da Terra, mas todas devem estar em planos que contenham o

a Terra e seus demais satélites artificiais. Nesse caso, na centro da Terra, de forma que o centro de força e o centro da

constante  $4\pi^2/GM$ , o termo  $M$  é a massa da Terra. órbita sejam coincidentes, como aquelas mostradas na figura 6.

A figura 6 mostra dois satélites artificiais. O satélite geoestacionário tem a órbita contida no plano equatorial  $F_x$  da Terra e gira no mesmo sentido da rotação do planeta.

Além disso, o período orbital desse satélite é igual a 24 h,

ou seja, igual ao tempo que a Terra gasta para girar  $F F$

em torno de si. Dessa forma, esse satélite permanece estacionário em relação à superfície da Terra, sendo ideal

para receber e transmitir sinais de rádio e televisão. Além

das características citadas anteriormente, a órbita de um

satélite geoestacionário deve situar-se a uma altitude igual *Figura 7: Órbitas cujos centros não coincidam com o centro da*

a seis vezes o raio da Terra. Esse valor pode ser deduzido *Terra não são estáveis.* diretamente da 3ª Lei de Kepler. O outro satélite na figura Para analisar a 2ª Lei de Kepler (velocidade areolar dos

tem a órbita contida no plano polar da Terra. Esse satélite é planetas é constante), considere a figura 8, que mostra um

uma espécie de escâner, pois, à medida que sobe e desce, planeta em duas posições. A área varrida pelo planeta (em

a superfície da Terra passa sob ele, permitindo que toda verde) pode ser aproximada pela área de um triângulo,

essa superfície seja fotografada.  $\Delta A = r(v.\Delta t)/2$ , em que  $r$  e  $v$  são, respectivamente, o raio

e o módulo da velocidade orbital do planeta, e  $\Delta t$  é o

Rotação Órbita  $v.\Delta t$  é a distância percorrida

pelo planeta durante o intervalo da Terra  
intervalo de tempo gasto nesse  
deslocamento. O produto



polar de tempo  $\Delta t$ . Passando  $\Delta t$  para o outro lado da  
equação,



obtemos  $\Delta A / \Delta t = r.v/2$ , que é a velocidade areolar do  
planeta. A constância dessa velocidade se deve ao fato  
de o produto

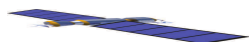


$r.v$  ser constante. Ao longo da órbita, quando  $r$   
aumenta,

6R  $v$  diminui, e vice-versa. Na figura 8,  
observe que  $r$  aumenta

ao longo do deslocamento, pois o planeta se afasta do  
Sol.

Por outro lado, como a componente tangencial da  
força



de atração exercida pelo Sol,  $F$ , é oposta ao



rádio ou TV Sinal de Órbita  $v$  diminui. Observe ainda que a componente radial,  $F_r$ , geostacionária exerce o papel da força centrípeta, alterando a direção da velocidade. Represente você mesmo um deslocamento em



Figura 6: A órbita geostacionária é ideal para comunicações, que  $r$  diminui e veja que a componente tangencial da força



e a polar, para o mapeamento do planeta. exercida pelo Sol, nesse caso, tem o mesmo sentido da

velocidade e, logo, o módulo desta aumenta.

As deduções da 1ª e da 2ª Lei de Kepler exigem uma matemática mais avançada. Por isso, apresentaremos apenas uma discussão conceitual sobre a relação entre essas leis e a Lei da Gravitação Universal. A 1ª Lei de Kepler



refere-se às órbitas elípticas dos planetas. Newton mostrou

que a trajetória de qualquer corpo que se move em torno r



de um centro de força, atraído por uma força cujo módulo é  $\propto 1/r^2$  proporcional ao inverso do quadrado da distância, deve ser  $F_y$  uma elipse, uma parábola ou uma hipérbole. As duas últimas

---

trajetórias seriam de corpos que fazem uma passagem nas vizinhanças do Sol e nunca mais voltam. A elipse e o círculo  $v$



(que é um caso especial de elipse) correspondem a órbitas fechadas, como aquelas de planetas e satélites. *Figura 8: A direção de  $v$  varia devido à componente  $F_y$ , e o módulo de  $v$  varia devido à componente  $F_x$ .*

# Lei da Gravitação Universal

**EXERCÍCIO RESOLVIDO** A força gravitacional exercida sobre o corpo, dentro do

túnel diametral que atravessa a Terra, provém apenas

da massa  $M'$  da esfera de raio  $r$  mostrada na figura

**02.** deste exercício. Aplicando a Lei da Gravitação Universal, Imagine que fosse possível construir um túnel que

atravessasse a Terra diametralmente, conforme mostra a obtemos o módulo dessa força:

figura a seguir. Supondo uma densidade  $\rho$  uniforme para

a Terra e desprezando qualquer força de atrito, mostrar  $G M m' / r^2 = F$  que um corpo, abandonado em uma das extremidades

do túnel, executa um movimento harmônico simples.

A massa  $M'$  pode ser calculada em função da densidade

Calcular o tempo que o corpo leva para viajar de uma

ponta à outra do túnel. Adotar  $\rho = 5,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  da Terra e do volume da esfera de raio  $r$ :

$$M' = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$$

3

Substituindo essa massa na equação anterior, obtemos

a expressão procurada:

$$G \frac{3}{2} \rho \pi 4 r^3 / 3 m \left( \right)$$

$$\frac{F}{m} = \frac{3}{2} \rho \pi 4 r^3 / 3 m$$

$$\Rightarrow 4\pi \rho G m r \cdot F = 3 \Rightarrow F = kr, \text{ em que } k = 4\pi \rho G m / 3$$

Como  $k$  é constante, a força e, é claro, a aceleração que atuam sobre o corpo são proporcionais a

### ***Resolução:***

$r$  (por isso, o gráfico da figura 4 é uma reta para

Para mostrar que o movimento do corpo é harmônico  $r < R$ ,  $R =$  raio da Terra). Além disso, a força e a

simples, precisamos provar que a força gravitacional que aceleração são sempre dirigidas para o centro da **FÍSICA**

a Terra exerce sobre o corpo, além de ser voltada para Terra, onde temos  $r = 0$ . Essas são as condições para o

o centro do planeta, é proporcional à distância  $r$  entre o movimento do corpo ser harmônico simples. Assim, após ser

corpo e o centro desta. A força de atração gravitacional abandonado em uma das extremidades do túnel, o corpo

exercida pela Terra sobre um corpo localizado em seu início o movimento com uma aceleração máxima ( $kR/m$ ),

interior é exercida apenas pela matéria localizada nas cascas internas ao corpo. Isso ocorre porque os elementos com  $r$ . No



centro da Terra, a força e a aceleração anulam-se,

de massa das cascas exteriores, em lados opostos mas a velocidade do corpo é máxima. Esse é o ponto

destas, exercem forças de sentidos opostos sobre um de equilíbrio do movimento. Após passar pelo centro da

corpo dentro da casca, conforme ilustra a figura a seguir. Terra, o corpo prossegue o movimento em direção à outra

O anulamento dessas forças decorre do fato de que o extremidade, com a força agindo no sentido oposto ao do

elemento mais próximo do corpo possui massa menor movimento, uma vez que ela deve ser sempre voltada para

do que aquela do elemento mais distante. Dessa forma, a posição  $r = 0$ . A aceleração cresce proporcionalmente

o efeito de proximidade, que tenderia a gerar uma com  $r$ , de forma que, na outra extremidade, a aceleração é

maior atração, é compensado pela menor quantidade máxima, mas a velocidade se anula. Então, o corpo cai em

de matéria. direção ao centro, repetindo o mesmo tipo de movimento

descrito anteriormente, emergindo com uma velocidade

$m_1$  nula na extremidade em que foi abandonado. O intervalo

de tempo necessário para que o corpo complete esse ciclo

$F_1$  pode ser calculado utilizando a equação do período do

$m$  movimento harmônico simples:

$$F_2$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{3m}{4\pi G \rho}} = 2\pi \sqrt{\frac{3}{4\pi G \rho}}$$

Substituindo  $\rho = 5,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e  $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$  nessa expressão, obtemos  $T = 5\,056 \text{ s} = 84 \text{ minutos}$ .

m O tempo para o corpo viajar de uma extremidade à outra 2 da Terra é a metade de  $T$ , ou seja, 42 minutos.

Editora Bernoulli **35**

**Frente B Módulo 10**

# LEITURA COMPLEMENTAR

## **Estrelas duplas**

A maioria das estrelas da Via Láctea, e, quem sabe, de todas reações,

elas possuem mesmo módulo, mesma direção e sentidos

as galáxias, são estrelas duplas, triplas, etc. Ao contrário do opostos, ou seja, elas são iguais e opostas, conforme indicado

nosso Sol, as estrelas tendem a formar sistemas múltiplos, em na figura anterior. Então, aplicando a Segunda Lei de Newton

que cada componente orbita em torno de um centro de massa e lembrando que a aceleração centrípeta é o produto entre o

comum. Nessa leitura, vamos deduzir a 3ª Lei de Kepler para um quadrado da velocidade angular e o raio, temos que:

sistema formado por duas estrelas. Veremos que a expressão

$$F = \text{massa} \cdot \text{aceleração} = M w^2 R = m w^2 r$$

da 3ª Lei de Kepler usada até agora é, na verdade, um caso

particular da equação geral que vamos apresentar nesta leitura. Se as estrelas realmente girarem em torno do centro de

A figura seguinte mostra duas estrelas que giram em órbitas massa C do sistema com a mesma velocidade angular  $w$ , então

circulares em torno do centro de massa C do sistema. A estrela esse termo pode ser cancelado nos dois lados da equação.

de massa maior (M) apresenta o raio orbital menor (R), enquanto Veja que, assim, temos que  $M \cdot R = m \cdot r$ , que é exatamente a

a estrela de massa menor (m) possui o raio orbital maior (r). igualdade que obtivemos utilizando o conceito de centro de

Utilizando o conceito de centro de massa (média, ponderada massa, conforme discutimos anteriormente. Isso ratifica que

em massa, das posições das massas das estrelas), podemos a velocidade angular realmente possui o mesmo valor para as

provar que  $M \cdot R = m \cdot r$ . Note que essa expressão indica que o duas estrelas.

centro de massa realmente localiza-se mais próximo à estrela

Por último, vamos obter a relação matemática entre o

mais massiva.

período  $T$  das estrelas e os raios  $R$  e  $r$  de suas órbitas. Como a força centrípeta sobre qualquer estrela, digamos a de massa  $m$ , deve ser igual à força gravitacional, então, temos:

$$r$$

$$m \omega^2 GMm = \frac{GMm}{(R+r)^2}$$

$$\omega$$

$$C M$$

Cancelando  $m$  e substituindo  $\omega$  por  $2\pi/T$  nessa equação, obtemos:

$$\begin{aligned} & 4 \\ & \pi^2 r \\ & GM \\ & T^2 \\ & 4\pi^2 \\ & = \\ & \Rightarrow \\ & = \\ & T \\ & ^2 \\ & ( \\ & R \\ & r \\ & + \\ & ) \\ & ^2 \\ & ( \\ & R \\ & r \\ & r \\ & + \\ & ) \end{aligned}$$

Outra propriedade fundamental sobre esse sistema é que Essa é a 3ª Lei de Kepler para um sistema binário, formado

as duas estrelas giram com a mesma velocidade angular  $w$ , por duas estrelas, ou por dois astros genéricos, que giram em

ou seja, o intervalo de tempo necessário para que uma estrela órbitas circulares. Quando  $M$  é muito maior do que  $m$ , o centro

complete a sua órbita é igual ao intervalo de tempo gasto por sua de massa do sistema coincide com o centro do astro massivo,

companheira para completar sua respectiva órbita. Dessa forma, de forma que  $R = 0$ . Nesse caso, obtemos a forma simples da

as estrelas giram solidariamente, como se estivessem unidas 3ª Lei de Kepler,  $T_2/r_3 = 4\pi^2/GM$ . Esse é o caso da massa do

por um raio trator. De fato, essa tração existe, e ela é a força nosso Sol, que é muito maior do que a massa de quase todos

de atração gravitacional entre as massas  $M$  e  $m$  das estrelas.

os planetas do Sistema Solar. A massa de Júpiter, porém,

É fácil explicar por que as velocidades angulares das estrelas é expressiva, de modo que o centro de massa do sistema

são iguais. As forças centrípetas que mantêm as estrelas em Sol-Júpiter acha-se um pouco acima da superfície do Sol.

órbitas circulares são exercidas pelas atrações gravitacionais Mesmo assim, a forma simplificada da 3ª Lei de Kepler pode

entre elas. Como essas forças constituem um par de ação e ser usada com precisão para o caso de Júpiter.

# Lei da Gravitação Universal

**EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO** II. Se a massa desse asteroide for igual à da Terra, uma

pedra solta pelo Pequeno Príncipe chegará ao solo antes de uma que é solta na Terra, da mesma altura.

**01.** Analisando-se essas hipóteses, pode-se concluir que (UFMG–2007) Três satélites – I, II e III – movem-se

em órbitas circulares ao redor da Terra. O satélite I tem A) apenas a I está correta.

massa  $m$  e os satélites II e III têm, cada um, massa  $2m$ . B) apenas a II está correta.

Os satélites I e II estão em uma mesma órbita de raio  $r$  C) as duas estão corretas.

e o raio da órbita do satélite III é  $r/2$ . Nesta figura D) nenhuma das duas está correta.

(fora de escala), está representada a posição de cada

um desses três satélites: **04.** (UFMG) Um satélite é colocado em órbita e fica

estacionário sobre um ponto fixo do Equador terrestre.

## II

I O satélite se mantém em órbita porque

A) a força de atração que a Terra exerce sobre o satélite equilibra a atração exercida sobre ele pela Lua.

B) a força que o satélite exerce sobre a Terra, de acordo com a 3ª Lei de Newton, é igual à força que a Terra

III exerce sobre o satélite, resultando disso o equilíbrio.

C) o satélite é atraído por forças iguais, aplicadas em todas as direções.

Sejam  $F_I$ ,  $F_{II}$  e  $F_{III}$  os módulos das forças gravitacionais D) o satélite está a uma distância tão grande da Terra

da Terra sobre, respectivamente, os satélites I, II e III. que a força gravitacional exercida pela Terra sobre o

Considerando-se essas informações, o satélite é desprezível.

**CORRETO**

afirmar que E) a força de atração da Terra é a força centrípeta

A)  $F = F < F$  . C)  $F < F < F$  . I necessária para manter o satélite em órbita em torno

II III I II III do centro da Terra com um período de 24 horas.

B)  $F_I = F_{II} > F_{III}$ . D)  $F_I < F_{II} = F_{III}$ .

**05. FÍSICA** (UFSCar-SP) Um satélite espacial encontra-se em órbita

**02.** (UFOP-MG–2008) Imagine que a massa do Sol se tornasse em torno da Terra e, no seu interior, existe uma caneta

subitamente 4 vezes maior do que é. Para que a força flutuando. Essa flutuação ocorre porque



de atração do Sol sobre a Terra não sofresse alteração,

A) ambos, o satélite espacial e a caneta, encontram-se

a distância entre a Terra e o Sol deveria se tornar em queda livre.

A) 4 vezes maior. C) 8 vezes maior. B) a aceleração da gravidade local é nula.

B) 2 vezes maior. D) 3 vezes maior. C) a aceleração da gravidade, mesmo não sendo nula,

é desprezível.

**03.** (UFMG) O Pequeno Príncipe, do livro de mesmo nome, D) há vácuo dentro do satélite.

de Antoine de Saint-Exupéry, vive em um asteroide pouco E) a massa inercial da caneta é desprezível, em

maior que esse personagem, que tem a altura de uma comparação com a do satélite.

criança terrestre. Em certo ponto desse asteroide, existe

uma rosa, como ilustrado nesta figura:

## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

**01.** (UFRGS) O módulo da força de atração gravitacional entre

duas pequenas esferas de massa  $m$ , iguais, cujos centros estão separados por uma distância  $d$ , é  $F$ . Substituindo-se

uma das esferas por outra de massa  $2m$  e reduzindo-se a distância entre os centros das esferas para  $d/2$ , resulta

uma força gravitacional de módulo

Após observar essa figura, Júlia formula as seguintes

hipóteses: A) F. D) 8F.

I. O Pequeno Príncipe não pode ficar de pé ao lado da B) 2F. E) 16F.

rosa, porque o módulo da força gravitacional é menor  
que o módulo do peso do personagem. C) 4F.

Editora Bernoulli **37**

## Frente B Módulo 10

**02.** (UFES) Suponha a Terra com a mesma massa, porém **06.** (IME-RJ-2010) No interior da Estação Espacial

com o dobro do raio. O nosso peso seria Internacional, que está em órbita em torno da Terra a

uma altura correspondente a aproximadamente 5% do

A) a metade. D) o quádruplo.

raio da Terra, o valor da aceleração da gravidade é

B) o dobro. E) reduzido à sua quarta parte. A) aproximadamente zero.

C) o mesmo. B) aproximadamente 10% do valor na superfície da Terra.

C) aproximadamente 90% do valor na superfície da Terra.

**03.** (CICE-RJ) Júpiter, o maior planeta do Sistema Solar, D) duas vezes o valor na superfície da Terra.

tem diâmetro 11 vezes maior do que a Terra e massa E) igual ao valor na superfície da Terra.

320 vezes maior que a terrestre. Qual será, na

superfície **07.** (Cesgranrio) Dois pêndulos simples, A e B, de mesmo

de Júpiter, o peso de uma astronauta e seu equipamento

comprimento, oscilam a nível do mar; o pêndulo A está cujo peso total na Terra é 1 200 N?

no Equador e o pêndulo B no polo da Terra. O tempo de A) 1 200 N C) 2 400 N E) 3 500 N oscilação (período) é

B) 1 800 N D) 3 200 N A) maior para A.

B)  
maior  
para  
B.

**04.** C) igual para A e B. (UFV-MG–2010) Seja F o módulo da força da gravidade

que o Sol faz sobre um cometa, de massa constante, D) função da temperatura ambiente.

cujo período orbital é T (em anos). Dos gráficos a seguir, E) variável com a estação do ano.

aquele que representa **CORRETAMENTE** a variação de **08.** (UFV-MG–2008) A figura a seguir ilustra a órbita do

F com o tempo t é: planeta Mercúrio em torno do Sol. Os pontos A e P

A) denotam o afélio e o periélio desse planeta, que estão a C) F F distâncias R e R do Sol, respectivamente. A P

$\frac{R_P}{R_A} = \frac{T_P}{T_A}$

B)  $\frac{F_D}{F}$

Sabendo que a razão entre os módulos das forças de

atração gravitacional entre o Sol e Mercúrio nos pontos P e A

$\frac{T_P}{T_A}$  é  $\frac{F_P}{F_A} = 2,3$ , é **CORRETO** afirmar que, dentre as alternativas

a seguir, a **MELHOR** aproximação para a razão  $R_P/R_A$  é

**05.** A) 0,43. B) 0,66. D) 0,12. C) 0,23.

(UPE–2010) A figura a seguir representa a trajetória de

duas estrelas idênticas (cada uma com massa M) que

**09.** (UFU-MG) Um astronauta observou que o período de

giram em torno do centro de massa das duas estrelas. um pêndulo simples, em um dos polos do planeta Alfa,

Cada órbita é circular e possui raio R, de modo que as era duas vezes maior que o período deste pêndulo,

duas estrelas estão sempre em lados opostos do círculo. quando medido nos polos da Terra. Sabendo-se que o

Considere  $G$  a constante de gravitação universal. dia desse planeta é 3 vezes menor que o dia terrestre,

e a aceleração centrípeta é 18 vezes maior do que a aceleração centrípeta na Terra, medidas no Equador dos

v M R v dois planetas, podemos afirmar sobre a massa do planeta R M Alfa ( $m_a$ ) em relação à massa da Terra ( $m_T$ ): A)  $m = 4m$  C)  $m = m_{aT}$

B)  $m = 2m$  D)  $m = 0,5m_{aT}$

**Analise as proposições que se seguem: 10.** (CESCEA-SP) Para um satélite permanecer em uma órbita

(04) A força de atração gravitacional de uma estrela sobre circular a uma altura  $h$  da Terra ( $h \ll R$ , sendo  $R$  o raio

a outra vale  $GM^2/4R^2$ . da Terra), é necessário que

(08) A velocidade orbital de cada estrela vale A) a aceleração centrípeta do satélite seja igual à  $4M/GR$ .

(12) O período de cada estrela vale  $4\pi^1 R^3/GM$ . B) a força de atração da Terra sobre o satélite seja aceleração da gravidade na altura  $h$ .

A soma dos números entre parênteses das proposições equilibrada pela atração do Sol sobre o satélite.

C) a velocidade angular do satélite seja proporcional à

que correspondem aos itens **CORRETOS** é igual a

altura  
 $h$ .

A) 24. B) 12. C) 8. D) 20. E) 16. D) N.d.a.

## Lei da Gravitação Universal

**11.** (CEFET-MG–2010) Considere os valores das seguintes

grandezas relacionadas ao movimento da Terra em torno do Sol:

T: período de translação da Terra

F: força de atração entre os dois

v: velocidade tangencial em sua órbita ao redor do Sol  $M$  c.m.

m

Se a massa do Sol dobrar, então



A) F dobra, v e T não se alteram.



B) T e F não se alteram e v dobra.

■

C) F e v ficam multiplicados por  $^12$ .



D) T fica dividido por  $^12$  e F duplica. Analise as alternativas:

E)  $T$  fica dividido por  $^12$  e  $v$  duplica. I. O raio da órbita do planeta menor é quatro vezes o

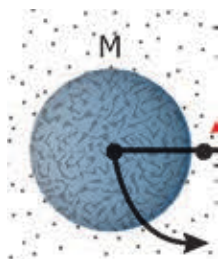
raio da órbita do planeta maior.

**12.** (UFJF-MG-2006) Considere dois satélites, A e B, com massas II. A velocidade escalar do planeta menor é quatro vezes

$m_A$  e  $m_B$  ( $m_A > m_B$ ), respectivamente, que giram em torno maior que a do planeta maior.

da Terra em órbitas circulares, com velocidades constantes III. O período da órbita do planeta menor é quatro vezes

de módulo  $v$ . Considerando que somente atue sobre eles a maior que o do planeta maior.



força gravitacional da Terra, podemos afirmar que

Assinale a alternativa **CORRETA**.

A) A tem órbita de raio maior que B.

B) A tem órbita de raio menor que B. A) Somente as afirmativas II e III estão corretas.

C) os dois satélites têm órbitas de raios iguais. B) Somente a

afirmativa I está correta.

D) a razão entre os raios das órbitas de A e de B é  $m_B/m_A$ .  
Somente as afirmativas I e II estão corretas.

B D) Somente a afirmativa II está correta.

E) a razão entre os raios das órbitas de A e de B é  $m_B/m_A$ .

E) Todas as afirmativas estão corretas. **FÍSICA**

**13.** (FUVEST-SP) Satélites utilizados para telecomunicações **15.**  
(VUNESP) Costumamos dizer que a aceleração da são colocados em órbitas geoestacionárias ao redor da gravidade é constante sobre um dado ponto da Terra, ou seja, de tal forma que permaneçam sempre superfície da Terra. Essa afirmação constitui uma boa aproximação para pequenas altitudes, pois, no caso Considere algumas condições que poderiam corresponder geral, aquela aceleração é dada por  $g = G(M_t/R^2)$ , a esses satélites: em que  $G$  é uma constante universal,  $M_t$  é a massa

I. Ter o mesmo período, de cerca de 24 horas. da Terra e  $R$  é a distância do ponto considerado ao

II. Ter aproximadamente a mesma massa. centro do planeta,  $R = h + R_t$  ( $R_t$  = raio da Terra).

III. Estar aproximadamente à mesma altitude. Chamando de  $g_t$  a gravidade sobre a superfície, a que

IV. Manter-se num plano que contenha o círculo do 2 altura  $h$  devemos subir para que  $g$  decresça 2% em

Equador terrestre. relação a  $g_t$ ? Despreze termos da ordem de  $(h/R_t)$ .

O conjunto de todas as condições a que satélites em Considere  $R_t = 6300$  km.

órbita geoestacionária devem, necessariamente, obedecer

corresponde a **16.** (PUC Rio) Um satélite de massa  $m$  gira com velocidade



A) I e III. angular  $w$  constante em torno de um planeta de massa  $M$ ,  
C) I, III e IV. E) II, IV.

em órbita circular de raio  $R$ .

B) I, II, III. D) II e III.

$m$

**14.** (PUCPR–2010) Um planeta binário é um sistema formado

$M$

por dois planetas que se atraem mutuamente pela força

$R$

gravitacional e que orbitam em torno do centro de massa

do sistema. Para que seja considerado planeta binário,

o centro de massa (c.m.) do sistema não pode se localizar

dentro de nenhum dos planetas. Suponha um planeta A)

**REPRESENTE**, no desenho anterior, por setas,  $a(s)$

binário composto por um planeta maior ( $M$ ) de massa força(s) que atua( $m$ ) no satélite.

quatro vezes a massa do planeta menor ( $m$ ), ambos B) **CALCULE** a velocidade angular  $w$  do satélite em função

realizando órbitas circulares em torno do centro de massa. de  $M$ ,  $R$  e  $G$  (constante de gravidade universal).

Editora Bernoulli **39**

## Frente B Módulo 10

**17.** (UFMG–2008) Um astronauta, de pé sobre a superfície



da Lua, arremessa uma pedra, horizontalmente, a partir de uma altura de 1,25 m, e verifica que ela atinge o solo a uma distância de 15 m. Considere que o raio da Lua é de  $1,6 \times 10^6$  m e que a aceleração da gravidade na sua superfície vale  $1,6 \text{ m/s}^2$ .

Com base nessas informações,

A) Considerando o texto e as Leis de Kepler, pode-se afirmar **CALCULE** o módulo da velocidade com que o

que a frase dita pelo astronauta

astronauta arremessou a pedra.

A) se justifica, porque o tamanho do telescópio determina

B) **CALCULE** o módulo da velocidade com que, nas

a sua massa, enquanto seu pequeno peso decorre da

mesmas condições e do mesmo lugar, uma pedra falta de ação da aceleração da gravidade. deve ser lançada, também horizontalmente, para que,

após algum tempo, ela passe novamente pelo local grande comparada à dele próprio, e que o peso do B) se justifica ao verificar que a inércia do telescópio é

de lançamento. telescópio é pequeno porque a atração gravitacional

criada por sua massa era pequena.

**SEÇÃO ENEM** C) não se justifica, porque a avaliação da massa e do

peso de objetos em órbita tem por base as Leis de Kepler, que não se aplicam a satélites artificiais.

**01.** As Ciências Naturais consistem em um conjunto de D) não se justifica, porque a força peso é a força

conhecimentos que permite explicar os fenômenos que exercida pela gravidade terrestre, neste caso sobre

ocorrem na natureza. O emprego dessas ideias leva ao o telescópio, e é a responsável por manter o próprio

telescópio em órbita.

entendimento e à previsão de fenômenos naturais que

E) não se justifica, pois a ação da força peso implica a

ocorrem na Terra, no Sol, em nossa galáxia e, ao que ação de uma força de reação contrária, que não existe

parece, nas partes mais longínquas do cosmos. Em outras naquele ambiente. A massa do telescópio poderia ser

palavras, os princípios e leis que governam a natureza são avaliada simplesmente pelo seu volume.

conceitos universais. Um dos exemplos mais contundentes

da universalidade da ciência é a Teoria da Gravidade, que foi

formulada pelo físico inglês Isaac Newton em 1666. De acordo

## GABARITO

com essa teoria, a força de atração gravitacional exercida

pela Terra sobre uma maçã que cai rumo ao chão tem

# Fixação

A) a mesma intensidade que a força de atração 01. C 02. B 03. B 04. E 05. A

gravitacional exercida pelo Sol sobre um planeta que

gira ao seu redor. **Propostos**

B) maior intensidade que a força de atração gravitacional

exercida pelo Sol sobre um planeta que gira ao 01. D 06. C  
11. D seu redor. 02. E 07. A 12. C

C) sentido oposto ao da força de atração gravitacional 03. D 08. B  
13. C

exercida pelo Sol sobre um planeta que gira ao 04. A 09. C  
14. C

seu redor. 05. E 10. A 15.  $h = 63 \text{ km}$

D) o mesmo sentido da força de atração gravitacional 16. A)

exercida pelo Sol sobre um planeta que gira ao  $m$  seu redor.

M

E) a mesma origem da força de atração gravitacional

exercida pelo Sol sobre um planeta que gira ao  
seu redor.

**02.** (Enem–2009) O ônibus espacial *Atlantis* foi lançado ao

espaço com cinco astronautas a bordo e uma câmera B)  $GM \omega = 3$

R

nova, que iria substituir uma outra danificada por um

curto-circuito no telescópio 17. A)  $12 \text{ m/s}$  *Hubble* . Depois de  
entrarem

em órbita a 560 km de altura, os astronautas se B)  $1,6 \times 10^3$  m/s

## Seção Enem

*Atlantis* e se dirigiram ao telescópio. Ao abrir a porta de acesso, um deles exclamou: “Esse telescópio tem a massa 01. E 02. D grande, mas o peso é pequeno.”

40 Coleção Estudo

## FÍSICA MÓDULO FRENTE

### Reflexão, refração e difração 09 C

Sabemos que a luz pode sofrer reflexão e refração durante Quando uma onda se propaga por uma corda, por exemplo, a sua propagação. Assim, é de se esperar que outros tipos de cada ponto do meio apresenta características de posição, ondas, como aquelas que se propagam em cordas, molas ou velocidade de vibração e aceleração. Dois ou mais pontos de

líquidos, também experimentem esses fenômenos. Isso, de fato, uma onda estão em fase (ou em concordância de fase) quando

é o que acontece. Dizemos que houve uma reflexão se a onda, apresentam valores iguais para essas três características.

após encontrar um obstáculo, retorna para o meio de origem Tais pontos devem estar separados por uma distância múltipla

com as mesmas características de velocidade, frequência e inteira de um comprimento de onda ( $\lambda$ ). A figura anterior mostra comprimento de onda. A onda sofre uma refração ao passar diversos pontos em fase. Entre eles, podemos citar: 1, 3 e 5 ou

de um meio para outro, diferente do primeiro, de modo que sua 2 e 4 ou A e C ou B e D. A figura mostra, ainda, outros quatro

velocidade de propagação e seu comprimento de onda sejam pares de pontos em fase. Esses pares estão destacados com

alterados, aumentando ou diminuindo, dependendo dos meios as mesmas cores (cinza, branco, preto ou alaranjado).

em questão. Apesar de tais variações, a frequência da onda Dois ou mais pontos de uma onda estão em oposição de fase

permanecerá inalterada durante a refração. se estiverem separados por uma distância que seja múltipla

A difração é outro fenômeno muito interessante. ímpar de meio comprimento de onda ( $\lambda/2$ ,  $3\lambda/2$ , etc.). Assim,

Diferentemente da reflexão, a difração é uma característica alguns pontos em oposição de fase, destacados na figura,

estritamente ondulatória, ou seja, apenas as ondas, ou são: 2 e 4 com 1, 3 e 5 ou A e C com B e D. Outros pontos

partículas que apresentem comportamento ondulatório, em oposição de fase são: os pontos cinza com os pretos ou

podem sofrer difração. Esse fenômeno é comum em nosso os brancos com os alaranjados. Observe que esses pontos

cotidiano e é responsável por uma série de efeitos que são simétricos em relação à posição de equilíbrio.

que se encontra do outro lado de um muro, por exemplo, é Quando duas ondas diferentes se propagam na mesma percebemos no dia a dia. O fato de ouvirmos uma pessoa

região do espaço e ao mesmo tempo, elas podem estar em

uma consequência da difração.

fase ou em oposição de fase. Considere as ondas (a) e (b)

Para estudarmos tais fenômenos, vamos apresentar mostradas a seguir. Observe que os pontos F e G vão descer

algumas definições iniciais. com a máxima velocidade de vibração (vem chegando um

vale de cada onda). Assim, dizemos que as duas ondas estão

em fase (ou em concordância de fase).

**FASE DE UMA ONDA**  $F M$  Considere um sistema massa-mola ideal executando um (a) (c) MHS na vertical entre os pontos M e N. Uma corda elástica  $v v$  ideal está presa ao bloco e, como consequência, uma onda

se propaga através dela, para a direita, com velocidade  $v$ .  $C_{ONDA} G N$  (b) (d) A figura a seguir mostra a vibração de alguns pontos da corda durante a passagem da onda. A linha azul pontilhada  $v$  mostra a onda em um instante posterior. Observe que alguns

A onda (c), ao atingir o ponto M, faz com que ele desça

pontos da corda devem descer e outros subir (velocidade de

com a máxima velocidade (está chegando um vale).

vibração para baixo e para cima, respectivamente).



A onda (d), por outro lado, faz com que o ponto N suba com

uma maior velocidade (está chegando uma crista).  
Nesse caso,



A C dizemos que as ondas (c) e (d), mostradas anteriormente,

estão em oposição de fase.

A mesma definição pode ser usada para ondas bi ou tridimensionais. Duas (ou mais) ondas estão em fase quando

em cada ponto do meio é atingido, simultaneamente, por ondas

com as mesmas características de aceleração, velocidade e

elongação. Se os pontos do meio recebem, ao mesmo tempo,

ondas com deslocamentos simétricos, as ondas estão em oposição de fase.

Editora Bernoulli 41

Frente C Módulo 09

# FRENTE E RAIO DE UMA ONDA

Alguns autores consideram que, se a frente de onda é

uma crista, todas as outras cristas são, também,  
frentes

Chamamos de frente de onda a todos os pontos da  
onda de onda. Nesta coleção, usaremos o termo  
frentes de onda

que atingem, simultaneamente, as partículas do meio  
pela secundárias. De uma forma geral, todos os pontos  
que

primeira vez. Ou seja, a frente de onda é a região da  
onda que estejam em concordância de fase com os  
pontos da frente

foi gerada no primeiro instante. Se a onda é  
bidimensional e se de onda são frentes de onda  
secundárias. essa região for uma crista, a frente de  
onda é formada por todos

os pontos que fazem parte dessa primeira crista. Se a  
onda é

unidimensional, a frente de onda se resume ao ponto  
que foi **REFLEXÃO DE ONDAS** gerado  
inicialmente. Nas figuras anteriores, os pontos F, G, M

e N, correspondentes à posição de equilíbrio da onda,  
são as Considere uma corda elástica ideal com uma  
das suas

frentes de onda de cada uma das ondas mostradas. O  
raio de extremidades presa a um suporte. Uma pessoa

vibra a

onda é um segmento imaginário, semelhante ao raio luminoso, extremidade livre da corda para cima e para baixo, apenas

que determina a direção de deslocamento da onda e que está uma vez, produzindo um pulso transversal na vertical

no mesmo sentido da velocidade de propagação desta. Dessa (que contém uma crista). Esse pulso se desloca para a direita

forma, o raio de onda, para ondas bi e tridimensionais, é sempre através da corda e, dessa forma, cada ponto da corda sobe

perpendicular à frente de onda em cada ponto. Considere dois e desce enquanto o pulso passa por ele. Quando o pulso

tipos de ondas que foram estabelecidos nas águas de um atinge o suporte, a onda sofre uma reflexão, e o pulso

lago, por exemplo. Veja as fotografias a seguir. A primeira, retorna pela corda, deslocando-se para a esquerda.

(a), é formada por ondas circulares que se propagam a partir A velocidade, a frequência e o comprimento de onda do

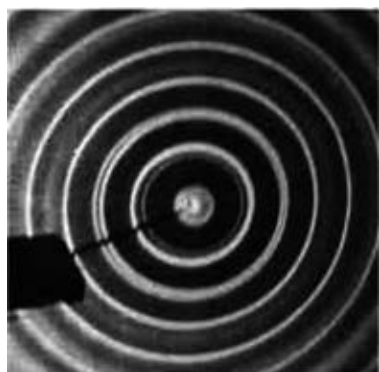
do ponto onde um pequeno objeto toca, sucessivamente, pulso não se alteram. Na reflexão, a amplitude da onda

a superfície da água. A outra, (b), é formada por ondas retas pode ser alterada. Como a amplitude depende da energia,

que se propagam a partir da posição em que uma pessoa a amplitude da onda refletida pode ser menor que a da onda

atinge, continuamente, a água com uma régua, por exemplo. incidente, desde que haja transferência de energia para o

suporte,  
por  
exemplo.



A fase da onda refletida, em relação à da onda incidente,



depende da conexão existente entre a corda e o suporte.

A figura a seguir mostra uma onda que se reflete numa extremidade fixa (ponto P de uma parede). A onda, ao atingir o ponto P, tenta empurrá-lo para cima. Como a corda está fixa e o ponto P não pode deslocar-se para cima, ele reage e empurra a corda para baixo. Como consequência, temos

(a) (b) uma onda refletida com inversão de fase em relação à onda

As figuras a seguir mostram, numa visão do alto, algumas incidente, ou seja, o pulso refletido apresenta um vale (V).

das cristas (C) das ondas que se formam na água. Considere, C<sub>v</sub> nas figuras, que a frente de onda seja uma crista. ONDA

Frente P (b)

(a) de onda

P

C C C C V V ONDA

c C C C  $\lambda$  Considere, agora, que a extremidade da corda está presa a um anel (A), de massa desprezível, que pode se deslocar

livremente, para cima e para baixo, em torno de uma haste.

Dessa forma, a extremidade da corda é móvel. Quando o

Raios de onda Frente de onda pulso atinge o anel, este sobe e desce junto com aquele,

*Frentes e raios de onda para uma onda circular e outra plana e a onda é refletida sem inversão de fase, ou seja, o pulso*

*que se propagam na água.* refletido também apresenta uma crista. Veja a seguir:

Na figura (a), as ondas foram geradas no centro dos círculos

e se propagam em todas as direções, conforme mostram C V ONDA os raios de onda. Na figura (b), elas foram produzidas à A esquerda e se propagam para a direita – numa única direção.

Veja que os raios de onda são paralelos entre si. Nas figuras, C V ONDA A a distância entre duas cristas consecutivas corresponde ao comprimento de onda ( $\lambda$ ) das ondas.

# Reflexão, refração e difração

Considere, agora, uma onda reta que se propaga na

## REFRAÇÃO DE ONDAS

água de um reservatório. Essa onda encontra, durante o seu deslocamento, um anteparo que impede a sua

A refração de qualquer onda obedece às mesmas leis de continuação e, dessa forma, obriga a onda a sofrer uma

vistas no estudo da Óptica. Sabemos que a velocidade (v)

reflexão. As figuras a seguir mostram uma frente de onda

Considere que O seja o ponto médio da frente de onda, R e I respectivamente. Assim, quando a onda sofre refração, R os raios de onda, incidente e refletido, respectivamente,  $v_R$  a sua frequência não altera, mas a velocidade deve, e que BP e AP estão sobre a normal no ponto de incidência. necessariamente, aumentar ou diminuir. O comprimento (AOB) antes e depois de atingir, obliquamente, o obstáculo. meio de propagação e do oscilador que produziu a onda, e a frequência (f) de uma determinada onda dependem do

Nas figuras, percebemos a 1ª Lei da Reflexão: os raios de onda ( $\lambda$ ) pode ser calculado por  $\lambda = v/f$ . Como a incidente e refletido (e as frentes de onda) estão no mesmo frequência permanece constante, o comprimento de onda plano (aqui, o plano da folha de papel). será proporcional à velocidade ( $\lambda \propto v$ ). Sabemos, também,

R B que os ângulos de incidência e refração, formados pelo raio A R<sub>RI</sub> de onda e pela normal, são proporcionais às velocidades da O O onda. O quadro e as figuras a seguir mostram as grandezas

A  $\theta$  de uma onda que sofre refração.  $i \theta_R B$

Fig. (a) Fig. (b)

Se a velocidade (v) Aumenta Diminui

P P

Frequência (f) Não altera Não altera

Logo,  $OB = OA$  e  $BP = AP \Rightarrow \sin \theta = \sin \theta \Rightarrow \theta = \theta$ .

$i R I R$  Ângulo de refração ( $\theta$  Assim, a 2ª Lei da Reflexão,

embora tenha sido demonstrada<sub>R</sub>) Aumenta Diminui (em

relação ao de incidência) Observe que os triângulos

destacados são congruentes. Comprimento de onda ( $\lambda$ )

Aumenta Diminui para uma onda reta, vale para qualquer tipo de onda.

A figura a seguir mostra uma onda que incide e é refletida Afasta Aproxima O raio de onda



(em  
relação  
à  
normal)

em um obstáculo. Uma eventual inversão de fase, que

pode ocorrer nesse caso, não foi contemplada nessa  
figura. (a) (b) **FÍSICA**  $N \ v \ v_1 \ N_1 \ R \ I$

$$\lambda \ \theta \ R_{I \ I} \ \theta_I \ \lambda_1$$

$$1$$

Meio 1 Meio 1 Meio 2 Meio 2

$$\theta \ R_{R \ R}$$

$$R \ \theta_R$$

$$R$$

$$\lambda \ \lambda_{2 \ 2} \ v_2 \ v_2$$

$$v \parallel$$

$$v \left[ \begin{array}{l} f \\ \end{array} \right.$$

$$=$$

$$f \left[ \begin{array}{l} f \\ \end{array} \right.$$

$$f$$

$$2$$

$$1$$

$$2$$

$$=1$$

Veja em destaque, a seguir, a parte da crista que parece  $\lambda > \lambda_v < v \Rightarrow \lambda < \lambda \mid \theta \mid$

estar “quebrada” na figura anterior. Se o anteparo não  $\mid r_i r_i > \theta \theta \theta \mid <$  estivesse na posição mostrada, a crista da onda ocuparia

a semirreta A’OB. O segmento da onda que já refletiu, AO, A figura a seguir mostra uma frente de onda, que nesse

é uma “imagem simétrica” da parte A’O em relação ao caso é uma crista, no instante em que ela atinge a superfície

anteparo, como se este fosse um espelho plano. de separação entre dois meios (PQ) e, depois, no momento

em que ela acaba de penetrar no segundo meio (RS).

A B Observe que os raios de onda e as suas cristas estão no plano

do papel. Logo, percebemos a 1ª Lei da Refração, vista no

estudo de Óptica: a normal e os raios incidente e refratado

O

são coplanares. As velocidades da onda nos meios 1 e 2

Anteparo refletor são  $v_1$  e  $v_2$ , e os ângulos dos raios de onda com a normal  $i$  e  $r$

(N) são  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , respectivamente. Enquanto a frente de

onda  $_{12}$  vai de uma posição a outra, os pontos P e Q se deslocam,

A' simultânea e respectivamente, até os pontos R e S.

Editora Bernoulli 43

## Frente C Módulo 09

Q Observe que as velocidades dos pulsos incidente e refletido

$v_1$  são iguais (mesma corda). A velocidade do pulso refratado é

$\theta$  menor que a do pulso refletido ( $v < v$ ), conforme já explicado.  $_{21}$

P  $\theta_1$  S Meio 1 Observe também que os pulsos, após incidirem na junção,  $_{1}$  Assim, o comprimento de onda é menor na corda 2 ( $\lambda = v/f$ ).

$\theta_2$  Meio 2 seguiram com amplitudes menores que a do pulso incidente,

$\theta_2$  incidente. pois nesse caso ocorreu uma divisão de energia da onda

R v 2 N Agora, o pulso foi estabelecido na  
corda de maior

densidade linear (2). Quando ele atinge a corda de  
menor

Como a onda propaga, em cada meio, com  
velocidade densidade linear (1), uma parte da onda  
é refletida e outra

constante, as distâncias percorridas, por cada ponto da  
parte é refratada, assim como no primeiro caso, exceto

extremidade da onda, são: quanto à fase do pulso  
refletido e quanto à velocidade

QS = v de propagação do pulso  
refratado. Como é fácil para  $\Delta t$  e PR =  
 $v \Delta t_{12}$  uma corda pesada oscilar a corda  
de menor densidade,

Nos triângulos destacados (PQS e SRP), temos:  
semelhante ao fenômeno de reflexão numa  
extremidade

sen livre, o pulso é refletido sem inversão de  
fase. Como a  $\theta = QS/PS$  e  $\text{sen } \theta = PR/PS_{12}$   
densidade linear da corda (1) é menor, o  
pulso refratado

(1)  $\text{sen } \theta = v \Delta t/PS$  e (2)  $\text{sen } \theta = v \Delta t/PS_{1122}$   
se propaga com velocidade maior que o pulso  
incidente.

Dividindo as equações (1) e (2), membro a membro, Logo, o comprimento de onda do pulso refratado é maior

encontramos a 2ª Lei da Refração, que pode ser escrita que o do pulso incidente. Veja a seguir. como:

$v_2$

(2) (1)



$$\text{se } \sin \theta_1 \lambda_1 = \sin \theta_2 \lambda_2 \quad \text{ou} \quad \frac{\sin \theta_1}{\lambda_1} = \frac{\sin \theta_2}{\lambda_2}$$

(2) (1)

# REFLEXÃO E REFRAÇÃO EM DIFRAÇÃO DE ONDAS CORDAS ELÁSTICAS

A difração é um fenômeno estritamente ondulatório

Considere duas cordas elásticas, de densidades lineares ( $\mu$ ) e muito complexo. Por isso, vamos fazer uma análise

diferentes, sendo  $\mu_1 < \mu_2$ . As duas cordas estão ligadas e,  $\mu_1$  semiquantitativa, procurando descrevê-lo com pouca

assim, a força de tração ( $F$ ) nas duas cordas é a mesma. abordagem matemática.

Sabemos que a velocidade da onda que se estabelece em cada Antes de iniciar, vamos entender o Princípio de Huygens,

corda é dada por  $v = F / \mu$ . Logo, a onda na corda de menor pois ele é a explicação para a difração.

Considere duas

densidade linear ( $\mu$ ) terá maior velocidade, ou seja,  $v > v_{12}$  ondas, uma reta e outra circular, se deslocando para cima,

conforme mostrado a seguir. Segundo Huygens, cada ponto

figura a seguir. Quando esse pulso atinge a corda de maior de ondas circulares. Dessa forma, a onda seria tangente a todas as ondas circulares formadas pelas fontes secundárias. densidade linear (2), parte do pulso sofre reflexão no ponto Logo, a onda, num momento posterior ao mostrado na de junção das cordas, enquanto a outra parte sofre refração. na corda de baixa densidade (1), conforme ilustrado na da onda se comporta como se fosse uma fonte secundária (F) Um pulso, que contém uma crista, foi estabelecido

A parte refletida volta com inversão de fase, pois é difícil a figura, estaria acima da posição atual, tangenciando as ondas circulares naquele instante.

corda leve fazer oscilar a de maior densidade, semelhante

ao fenômeno de reflexão numa extremidade fixa. A parte

refratada conserva a mesma fase e a mesma frequência da

onda incidente. Veja a seguir. F F F F F F F F F F F F F F F F  $v_1$

(1) (2) Geralmente, uma onda se propaga em linha reta, ou

$v_2$  (raio de onda),  
mantém essa direção  
durante sua seja, a  
energia que sai da  
fonte, numa dada  
direção

(1) (2)

$v_1$  de onda continuam retilíneos após tais fenômenos. propagação. Se ela sofre reflexão ou refração, os raios

A propagação retilínea, dependendo de alguns fatores, pode Se o comprimento de onda ( $\lambda$ ) aumenta e / ou a largura não acontecer. Considere uma onda reta, de comprimento do orifício ( $d$ ) diminui, a difração se torna mais acentuada

de onda  $\lambda$ , que se propaga para a direita na água contida e a onda invade, cada vez mais, a região de “sombra”.

em uma cuba de ondas. Veja a figura a seguir. As cristas Se essas grandezas são da mesma ordem de grandeza,

e os raios de onda estão representados pelas linhas azuis ou seja, com valores próximos um do outro, a difração é

e vermelhas, respectivamente. Se a onda é parcialmente muito pronunciada e bastante perceptível.

(não mostrada na figura) e a outra prossegue. Era de se 2)  $\lambda \approx d$  interrompida por um obstáculo, uma parte dela é refletida

esperar que a parte não refletida continuasse o seu trajeto Se o comprimento de onda ( $\lambda$ ) é igual (ou muito na mesma direção de incidência. Entretanto, não é o que próximo) à largura da fenda ( $d$ ), temos uma difração

acontece. A região em destaque cinza, à direita da figura, extremamente pronunciada, e as ondas que



“saem” do

corresponde à “sombra” do obstáculo. Observe que a orifício são praticamente circulares, como se no centro do

parte da onda não interrompida contorna o obstáculo e orifício existisse uma única fonte secundária gerando ondas

invade a região de “sombra”. Esse fenômeno se chama circulares. Veja a seguir. Observe que a onda invade toda a

difração e pode ocorrer quando a onda encontra um região de “sombra” destacada na cor cinza. obstáculo, um orifício ou uma fenda entre dois obstáculos.

A velocidade, a frequência e o comprimento de onda da onda

não sofrem alteração quando ela se difrata. Apenas a forma

da onda se modifica.

d

$\lambda \lambda$

3)  $\lambda$   
> >  
d

$\lambda$

Se o comprimento de onda ( $\lambda$ ) é muito maior que a largura

da fenda ( $d$ ), não haverá difração. Ou seja, toda a onda é

Observe que a região da onda na parte inferior da figura **FÍSICA** refletida pelo obstáculo como se o orifício não existisse.

anterior é refletida pelo obstáculo. Assim, o equilíbrio que

Isso acontece mesmo se a barreira tiver vários orifícios.

havia entre as ondas formadas pelas fontes secundárias

Veja a seguir.

foi quebrado. Dessa forma, a fonte secundária que está na

parte inferior da onda não refletida gera uma onda circular

que tende a contornar aquela barreira.

Vamos discutir mais detalhes da difração. Considere um

orifício ou uma barreira de dimensão igual a ( $d$ ). A difração é mais ou menos acentuada e, portanto, perceptível dependendo

da relação entre essa grandeza e o comprimento de

onda ( $\lambda$ ). As situações a seguir mostram o que acontece quando a

onda, formada por cristas retas, por exemplo, encontra orifícios de tamanhos variados. Se a onda encontrar uma barreira (obstáculo), em vez

de uma fenda, o seu comportamento apresentará duas

1)  $\lambda \ll d$  importantes diferenças em comparação com a difração em

Se o comprimento de onda ( $\lambda$ ) é muito menor que a largura

do orifício ( $d$ ), a onda passa através dele sem que a difração de onda da onda forem da mesma ordem de grandeza,

seja perceptível. Ou seja, os raios continuam quase que a difração é acentuada e a onda vai contornar o obstáculo,

em linha reta, e a onda praticamente não invade a região invadindo toda a “sombra” produzida por ele, de forma

de “sombra” dos obstáculos que formam o orifício. Veja a semelhança à difração no orifício de mesma dimensão do

seguir. Observe que as partes das cristas contidas na região comprimento de onda. Por outro lado, se as dimensões da

do orifício continuam sendo retas. barreira são muito

maiores que o comprimento de onda,  
a parte da onda que chega às laterais do obstáculo  
segue  
direto sem sofrer difração perceptível, e a região de  
“sombra”  
não é invadida pela onda. E, por último, se a onda  
incide  
d em uma barreira de dimensões muito menores que o  
comprimento de onda, a onda vai seguir o seu trajeto  
normal.  
 $\lambda$  Ou seja, o obstáculo não interfere na trajetória da  
onda e  
nenhuma difração é observada.

Editora Bernoulli 45

## Frente C Módulo 09

A tabela a seguir mostra o valor do comprimento de  
onda A) Determinar a velocidade das ondas em cada região.  
de três ondas muito conhecidas. Com base nesses  
valores, B) A velocidade da onda na água depende, basicamente,  
vamos analisar a difração de tais ondas. da profundidade  
da água (h) e da aceleração da  
gravidade (g). Com base na análise dimensional,

**Onda no Sistema Internacional (SI), determinar a  
Comprimento de onda ( $\lambda$ )**

proporcionalidade entre a velocidade da onda e as

Som 1,7 cm a 17 m

grandezas citadas.

Luz 4,0 x 10<sup>-7</sup> mm a 7,0 x 10<sup>-7</sup> mm

Micro-ondas de um forno ~12 cm **Resolução:**

Considere duas pessoas, uma de cada lado de um muro A) A frequência das ondas é imposta pelo gerador. Assim, de 2,0 m de altura e 30 cm de espessura. Elas podem se a frequência da onda nas duas regiões é igual à da ouvir, mas não podem se ver. É fácil perceber o motivo. fonte:

O comprimento de onda do som da voz de uma pessoa é da  $f = f = f = 2,0 \text{ Hz}$  1 2 FONTE mesma ordem de grandeza das dimensões do muro. Dessa Usando  $v = \lambda f$ , temos:

forma, o som difrata bastante e atinge a pessoa do outro lado.  $v_1 = 0,10.2,0 \Rightarrow v_1 = 0,20 \text{ m/s}$  As dimensões do muro, por sua vez, são muito maiores  $v$  que o comprimento de onda da luz refletida pelas pessoas.  $v_2 = 0,20.2,0 \Rightarrow v_2 = 0,40 \text{ m/s}$  Dessa forma, essa onda passa pela parte superior do muro, B) A unidade de velocidade é  $[v] = \text{m/s}$ , da aceleração da

sem sofrer difração perceptível, e não chega à pessoa do gravidade é  $[g] = \text{m/s}^2$ , e da profundidade é  $[h] = \text{m}$ .

outro lado. Como queremos obter m/s, devemos multiplicar as

grandezas e extrair a sua raiz quadrada, ou seja:

O forno de micro-ondas tem uma tampa com furinhos da

ordem de 1,0 mm. Quando ele é acionado, e a luz interna se acende, podemos ver os alimentos em seu interior. Isso acontece porque o furinho da tampa tem diâmetro

muito maior que o comprimento de onda da luz. Assim, esta

passa pelo orifício sem sofrer difração acentuada, o que nos **EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO** permite uma visão distinta dos objetos no interior do forno.

**01.** (UFF-RJ) A figura representa a propagação de dois pulsos

**PARA REFLETIR** em cordas idênticas e homogêneas. A

extremidade



esquerda da corda, na situação I, está fixa na parede e,



Por que as micro-ondas do forno não atravessam na situação II, está livre para deslizar, com atrito



a tampa do aparelho? desprezível, ao longo de uma haste.



## EXERCÍCIO RESOLVIDO



**01.** Situação I Situação II Dentro de uma cuba de ondas, contendo água, foi

colocado um bloco de modo a formar duas regiões de Identifique a opção em que estão **MAIS BEM**

profundidades diferentes. As figuras a seguir mostram, representados os pulsos refletidos nas situações I e II.

numa vista superior e lateral, respectivamente, as ondas que se propagam na água, a partir da esquerda. A)

O oscilador que produz as ondas vibra com uma frequência I II de 2,0 Hz. Os comprimentos de onda, nas partes rasa (1) B) e profunda (2), são 10 cm e 20 cm, respectivamente.

I  
II

C)

I  
II

D)

I  
II

1 2 E)

I  
II

46 Coleção Estudo

## Reflexão, refração e difração

**02.** (UFC) A figura mostra duas fotografias de um mesmo **05.**



(UFAL) Na figura a seguir, está representada a propagação

pulso que se propaga em uma corda de 15 m de de uma onda que atinge um obstáculo no qual é feito um

comprimento e densidade uniforme, tensionada ao orifício.

longo da direção x. As fotografias foram tiradas em dois

instantes de tempo, separados de 1,5 segundo. Durante

esse intervalo de tempo, o pulso sofreu uma reflexão na

extremidade da corda que está fixa na parede P.

v P

x (m)

0 3 6 9 12 15

Sobre o fenômeno reproduzido na figura, analise as

x (m) afirmações:

0 3 6 9 12 15

v ( ) O fenômeno reproduzido na figura chama-se refração.

( ) Ondas luminosas não se comportam como a onda

Observando as fotografias, verificamos que a velocidade reproduzida na figura.

de propagação do pulso na corda, suposta constante, é ( ) O fenômeno reproduzido na figura explica por que

A) 4 m/s. C) 8 m/s. E) 12 m/s. ouvimos o som emitido por uma fonte mesmo que,

B) 6 m/s. entre nós e a fonte, exista, por exemplo, um muro D) 10 m/s.

de concreto.

**03.** ( ) Apenas ondas propagando-se em meio material se (UFMG) Uma onda sofre refração ao passar de um meio I

para um meio II. Quatro estudantes, Bernardo, Clarice, comportam como o modelo reproduzido na figura.

Júlia e Rafael, traçaram os diagramas mostrados na figura ( ) Quanto maior for a largura do orifício, menos será

para representar esse fenômeno. Nesses diagramas, possível observar o fenômeno reproduzido na figura.

as retas paralelas representam as cristas das ondas e as

setas, a direção de propagação da onda.

## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

I Bernardo Clarice I **01.** (UNIFESP–2008) A figura representa um pulso se II II propagando em uma corda. **FÍSICA**

I Júlia Rafael I

II II Pode-se afirmar que, ao atingir a extremidade dessa corda, o pulso se reflete

A) se a extremidade for fixa e se extingue se a

Os estudantes que traçaram um diagrama coerente com extremidade for livre.

as leis da refração foram B) se a extremidade for livre e se extingue se a

A) Bernardo e Rafael. extremidade for fixa. C) Júlia e Rafael.

B) Bernardo e Clarice. C) com inversão de fase se a extremidade for livre e com D) Clarice e Júlia.

a mesma fase se a extremidade for fixa.

**04.** D) com inversão de fase se a extremidade for fixa e com (UFV-MG–2006) A figura a seguir representa uma

fotografia aérea de um canal onde uma onda se propaga a mesma fase se a extremidade for livre.

na superfície da água, da região 1 para a região 2. E) com mesma fase, seja a extremidade livre ou fixa.

As linhas contínuas e paralelas representam as cristas

das ondas. **02.** (UCSal-BA) O esquema representa um pulso que se

propaga numa mola de extremidades fixas. A seta indica o sentido de propagação.

Região 1 Região 2

Comparando com a região 1, é Entre os esquemas a seguir, o que corresponde ao pulso **CORRETO** afirmar que

na região 2 refletido é

A) a frequência da onda é maior. A) D)

B) a velocidade de propagação da onda é menor. B) E)

C) o comprimento de onda é maior.

D) a razão entre a velocidade e a frequência é maior. C)

E) a razão entre a velocidade e a frequência é a mesma.

Editora Bernoulli **47**

## Frente C Módulo 09

**03.** (PUC Rio) Um pulso com a forma mostrada na figura a **07.** (PUC

RS) A velocidade de uma onda sonora no ar é

seguir propaga-se com uma velocidade constante ( $v$ ) ao 340 m/s, e seu comprimento de onda é 0,340 m. Passando

longo de uma corda que tem a sua extremidade presa a para outro meio, onde a velocidade do som é o dobro

uma parede. (680 m/s), os valores da frequência e do comprimento

$v$  de onda no novo meio serão, respectivamente,

A)  
400  
Hz  
e  
0,340  
m.

B)  
500  
Hz  
e  
0,340  
m.

Qual das opções **MELHOR** apresenta a forma que o pulso

C) 1 000 Hz e 0,680 m.

terá após refletir-se na extremidade fixa da corda?

A)  $v$  D) 1 200 Hz e 0,680 m.

E) 1 360 Hz e 1,360 m.

B)  $v$  E) **08.** (UFMG) Para se estudar as propriedades das ondas num

C)  $v$  tanque de água, faz-se uma régua de madeira vibrar

regularmente, tocando a superfície da água e produzindo

uma série de cristas e vales que se deslocam da esquerda

**04.** para a direita. Retirando-se uma certa quantidade de água

(UFMG–2008) Quando uma onda sonora incide na do tanque, a velocidade das ondas torna-se menor.

superfície de um lago, uma parte dela é refletida e a outra

é transmitida para a água. Régua

Sejam  $f$  de a frequência da onda incidente,  $f$  a frequência  $f_R$  madeira da onda refletida e  $f_T$  a frequência da onda transmitida

para a água.

Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar

Direção e sentido

que

de propagação

A)  $f = f$  e  $f > f$ . C)  $f = f$  e  $f = f$ . RITIRITI Nessas condições, pode-se afirmar que B)  $f < f$  e  $f > f$ . D)  $f < f$  e  $f = f$ . RITIRITI A) a frequência da onda aumenta, e o seu comprimento

**05.** de onda também aumenta. (FCMMG) Uma onda plana é emitida na superfície de um

líquido (meio 1) e atinge, após alguns instantes, uma B) a frequência da onda diminui, e o comprimento de

região de maior profundidade (meio 2). Nas figuras a onda também diminui.

seguir, cada grupo de quatro retas representa as cristas C) a frequência da onda não se altera, e o seu

das ondas e a seta, o sentido de propagação dessas comprimento de onda aumenta.

ondas. O diagrama que **MELHOR** representa a disposição

D) a frequência da onda não se altera, e o seu

das cristas das ondas nos dois meios é comprimento de onda diminui.

A) C) E) a frequência da onda não se altera, e o seu Meio 1

Meio 1 comprimento de onda também não se altera.

**09.** (UFMG–2009) Numa aula no laboratório de Física,

Meio 2 Meio 2 o professor faz, para seus alunos, a experiência que se

descreve a seguir. Inicialmente, ele enche de água um

B) D) Meio 1 recipiente retangular, em que há duas regiões – I e II  
–,

Meio 1 de profundidades diferentes. Esse recipiente, visto de cima, está representado nesta figura:

Meio 2 Meio 2

Recipiente

Régua

**06.** (UFV-MG–2009) Uma onda luminosa monocromática I II

proveniente do ar passa a se propagar no vidro. Lembrando

que a velocidade de propagação da luz no vidro é menor No lado esquerdo da região I, o professor coloca uma régua

que no ar, é a oscilar verticalmente, com frequência constante, de **CORRETO** afirmar que, no vidro,

modo a produzir um trem de ondas. As ondas atravessam

A) o comprimento de onda da luz será menor que no ar. a região I e propagam-se pela região II, até atingirem o

B) a frequência da luz será maior que no ar. lado direito do recipiente. Na figura, as linhas representam

C) a frequência da luz será menor que no ar. as cristas de onda dessas ondas. Dois dos alunos que

D) o comprimento de onda da luz será o mesmo que no ar. assistem ao experimento fazem, então, estas observações:

## 48 Coleção Estudo

### Reflexão, refração e difração

• Bernardo: “A frequência das ondas na região I é menor **13.** (UFMG) Para se estudar as propriedades das ondas num

que na região II.” tanque de água, faz-se uma régua de madeira vibrar

• Rodrigo: “A velocidade das ondas na região I é maior regularmente, tocando a superfície da água e produzindo

que na região II.” uma série de cristas e de vales que se deslocam da

Considerando-se essas informações, é esquerda para a direita.  
**CORRETO**

afirmar que Na figura a seguir, estão esquematizadas duas barreiras

A) apenas a observação do Bernardo está certa. verticais separadas por uma distância aproximadamente

B) apenas a observação do Rodrigo está certa. igual ao comprimento de onda das ondas.

C) ambas as observações estão certas.

D) nenhuma das duas observações está certa. Régua

de

**10.** (UNIRIO-RJ) Um vibrador produz ondas planas na superfície madeira

de um líquido com frequência  $f = 10 \text{ Hz}$  e comprimento de onda  $\lambda = 28 \text{ cm}$ . Ao passarem do meio I para o meio II, como mostra a figura, foi verificada uma mudança na direção de propagação das ondas.

Direção e sentido de propagação

Após passar pela abertura, a onda apresenta modificação

A) em sua forma e em seu comprimento de onda.

B) em sua forma e em sua velocidade.

Meio I  $45^\circ$  C) em sua velocidade e em seu comprimento de onda. Meio II  $30^\circ$  D) somente em sua forma.

E) somente em sua velocidade.

**14.** (Fatec-SP-2010) Um forno de micro-ondas tem em sua

Dados:  $\sin 30^\circ = \cos 60^\circ = 0,5$ ; porta uma grade junto ao vidro, com espaços vazios

$\sin 60^\circ = \cos 30^\circ = \text{menores}$   
que o comprimento de onda  
das micro-ondas,  $\frac{1}{2}$ ; a fim  
de não permitir que essas



ondas atavessem a porta.

FÍSICA  $\sin 45^\circ = \cos 45^\circ = \frac{1}{2}$  e considere  $\frac{1}{2} = 1,4$ .

Supondo a frequência de 2,45 GHz (G = Giga =  $10^9$ ) e a

No meio II, os valores da frequência e do comprimento velocidade de propagação de uma onda eletromagnética

de onda serão, respectivamente, iguais a de  $3 \times 10^8$  m/s, o comprimento de onda das micro-ondas

A) 10 Hz; 14 cm. será, aproximadamente, em cm, de D) 15 Hz; 14 cm.

B) 10 Hz; 20 cm. A) 2. E) 15 Hz; 25 cm.

C) 10 Hz; 25 cm. B) 5.

C)  
8.

**11.** (UFC) Para que ocorra difração, a onda deve encontrar D) 10.

A) um obstáculo de dimensões muito menores que seu E) 12.

comprimento de onda.

B) uma fenda de dimensões muito maiores que seu

**15.** (UFOP-MG-2007) As sentenças a seguir se referem

comprimento de onda. a situações que são explicadas pelas leis da reflexão

C) uma fenda de dimensões muito menores que seu e / ou da refração, **EXCETO**

comprimento de onda.

A) O pescador situado à beira do rio vê o peixe nadando

D) uma fenda ou obstáculo de dimensões da mesma dentro da água.  
O que o pescador está vendo é a

ordem de grandeza do seu comprimento de onda. imagem virtual do  
peixe formada acima da posição

**12.** ocupada pelo peixe. (UFMG) O muro de uma casa separa Laila de sua

B) A luz branca do Sol dispersa em gotículas de água  
gatinha. Laila ouve o miado da gata, embora não consiga

em suspensão na atmosfera durante ou após a chuva,  
enxergá-la. Nessa situação, Laila pode ouvir, mas não

formando o arco-íris.

pode ver sua gata, porque

A) a onda sonora é uma onda longitudinal e a luz é uma C) A fibra  
óptica é um material que permite transmitir

onda transversal. a luz de uma fonte luminosa de um ponto a outro.

B) a velocidade da onda sonora é menor que a velocidade Esse é o  
princípio básico de funcionamento de um

da luz. endoscópio que permite ao médico visualizar o interior  
do estômago de um paciente.

C) a frequência da onda sonora é maior que a frequência

da luz visível. D) Um menino está de um lado do muro alto de sua  
casa

D) o comprimento de onda do som é maior que o ouvindo a  
conversa das garotas que estão do outro

comprimento de onda da luz visível. lado do muro.

# Frente C Módulo 09

**16.** (UFG–2010) Uma estação de rádio emite ondas médias • Ondas P (ou primárias) – movimentam as

na faixa de 1 MHz com comprimento de onda de 300 m. partículas do solo, comprimindo-as e dilatando-as.

Essa radiação contorna facilmente obstáculos como casas, A direção do movimento das partículas é paralela

carros, árvores, etc., devido ao fenômeno físico da à direção de propagação da onda;

• Ondas S (ou secundárias) – movimentam as

A) difração. C) reflexão. E) difusão.

partículas do solo perpendicularmente à direção da

B) refração. D) interferência. propagação da onda.

**17.** A figura a seguir mostra como varia a velocidade das

(UFLA-MG–2009) Uma onda sonora passa do ar para a ondas em função da profundidade.

água. Pode-se afirmar que



A) sua velocidade de propagação aumenta, sua Zona de baixa ) 1 000  
 velocidade frequência diminui e seu comprimento de onda Ondas S Ondas P 2  
 000 também diminui. 3 000 B) sua velocidade de propagação diminui,  
 sua frequência 4 000 não se altera e seu comprimento de onda aumenta.

C) sua velocidade de propagação aumenta, sua 5 000 Profundidade (km 6  
 000 frequência não muda e seu comprimento de onda 2 4 6 8 10 12 14

aumenta. Velocidade (km/s)

D) sua velocidade de propagação não se altera, sua

frequência aumenta e seu comprimento de onda Núcleo  
 interno sólido



Núcleo externo líquido



diminui. Manto



Manto superior



Litosfera



# SEÇÃO ENEM

Com base na análise do texto e da figura, podemos



concluir  
que

A) as ondas S são sempre mais rápidas que as ondas P.

**01.** (Enem–2009) A ultrassonografia, também chamada de B) as ondas S são longitudinais.

ecografia, é uma técnica de geração de imagens muito C) as ondas P são transversais.

utilizada em Medicina. Ela se baseia na reflexão que ocorre D) as ondas P, à medida que se propagam, possuem

quando um pulso de ultrassom, emitido pelo aparelho sempre velocidades crescentes.

colocado em contato com a pele, atravessa a superfície que E) as ondas S e P sofrem refração no interior do planeta

separa um órgão do outro, produzindo ecos que podem Terra.

ser captados de volta pelo aparelho. Para a observação de

detalhes no interior do corpo, os pulsos sonoros emitidos

## GABARITO

têm frequências altíssimas, de até 30 MHz, ou seja,

30 milhões de oscilações a cada segundo.

A determinação de distâncias entre órgãos do corpo

**Fixação**

humano feita com esse aparelho fundamenta-se em duas 01. B 03. D  
05. F F V F V

variáveis imprescindíveis:

02. E 04. B

A) A intensidade do som produzido pelo aparelho e a  
frequência desses sons.

B) A quantidade de luz usada para gerar as imagens no

## Propostos

aparelho e a velocidade do som nos tecidos. 01. D 10. B

C) A quantidade de pulsos emitidos pelo aparelho a

02. A 11. D

cada segundo e a frequência dos sons emitidos pelo  
aparelho. 03. D 12. D

D) A velocidade do som no interior dos tecidos e o tempo 04. C 13.  
D

entre os ecos produzidos pela superfícies dos órgãos. 05. D  
14. E

E) O tempo entre os ecos produzidos pelos órgãos e a

06. A 15. D

quantidade de pulsos emitidos a cada segundo pelo  
aparelho. 07. C 16. A

08. D 17. C

**02.** Terremotos, ou sismos, são tremores bruscos e 09. B

passageiros que acontecem na superfície da Terra,

# Seção

## Enem

da crosta terrestre. Esses choques liberam uma grande quantidade de energia, a qual se propaga pela Terra, em 01. D todas as direções, por meio de ondas elásticas.

02.  
E

Diversos tipos de ondas elásticas são produzidos quando ocorre um terremoto. Os tipos mais importantes são:

50 Coleção Estudo

## FÍSICA MÓDULO FRENTE

### Interferência de ondas 10 C

A interferência, assim como a difração, é um fenômeno

estritamente ondulatório. Assim, apenas as ondas, ou partículas que possuam comportamento ondulatório,

podem sofrer interferência. Esse fenômeno é comum no a) nosso dia a dia e muitos são os exemplos de

interferência

na natureza. As belas cores na cauda de um pavão, por exemplo, são explicadas pela interferência da luz. Como é

um fenômeno complexo, vamos analisar a interferência com

o mínimo de abordagem matemática.

O fenômeno da interferência é consequência de um princípio simples chamado de Princípio da Superposição.

Nesta Coleção, vamos tratar apenas das ondas para as b) quais esse princípio é válido. A superposição ocorre quando

dois ou mais pulsos ocupam, num dado instante, o mesmo

lugar no espaço.

Considere dois pulsos completos, com a mesma amplitude

e em oposição de fase, que se propagam em sentidos

## PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO

opostos ao longo de uma corda elástica, em cinco instantes

de tempo. Considere cada quadriculado da figura a seguir



O Princípio da Superposição pode ser usado tanto para com dimensões  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  e que a velocidade de cada

as ondas transversais quanto para as longitudinais. Vamos pulso seja igual a  $1,0\text{ cm/s}$ . Dessa forma, a cada segundo,

começar com a superposição de dois pulsos unidimensionais os pulsos caminham  $1,0\text{ cm}$ . Cada figura da direita, em cada

numa corda elástica, por exemplo. Quando dois pulsos se um dos instantes, mostra a onda resultante e, claro, a forma

cruzam, numa certa posição e num dado instante, os seus que a corda assume devido à superposição dos pulsos.

efeitos se sobrepõem. Assim, cada ponto do meio deve deslocar-se, naquele instante, de acordo com a “resultante”

dos efeitos individuais de cada pulso. O efeito resultante pode

fazer com que o deslocamento de cada ponto da corda seja  $t = 0$  maior ou menor do que aquele que ela teria se apenas um

pulso se propagasse.

Sejam  $x$  a elongação resultante da corda com os pulsos

superpostos e  $x$  e  $x$  as elongações da corda devido a

cada <sub>1 2</sub>

pulso individual. Se os pulsos têm:  $t = 1 \text{ s}$

1 – Elongações de mesmo sinal  $\Rightarrow x = x_1 + x_2$

2 – Elongações de sinais opostos  $\Rightarrow x = x_1 - x_2$

A interferência, que acontece devido à superposição  $t = 2 \text{ s}$

dos pulsos, pode ser de dois tipos. Se as elongações de um determinado ponto do meio, devido a cada comando

individual, são somadas, a interferência é chamada de construtiva. Se as elongações são subtraídas, ela é chamada de interferência destrutiva. Um fato importante

da interferência diz respeito ao que acontece com cada  $t = 3 \text{ s}$  pulso após a superposição deles. Independentemente do

tipo de interferência (construtiva ou destrutiva), após a

superposição dos pulsos, cada um segue o seu caminho com

as mesmas características originais. Ou seja, cada pulso

mantém inalterados a forma, a velocidade, a frequência e o  $t = 4 \text{ s}$  comprimento de onda. Veja a seguir a superposição de dois

pulsos transversais em fase (a) e em oposição de fase (b).

Editora Bernoulli 51

## Frente C Módulo 10

No instante  $t = 2 \text{ s}$ , as cristas e os vales dos dois pulsos a amplitude resultante é máxima, e a água tem a sua maior

se superpõem. Dessa forma, a onda resultante apresenta oscilação. Um objeto flutuante, colocado em qualquer um

amplitude igual a  $4,0 \text{ cm}$ . Nos instantes  $t = 1 \text{ s}$  e  $t = 3 \text{ s}$ , desses pontos, oscila para cima e para baixo com uma

a crista de um pulso se sobrepõe ao vale do outro e amplitude  $2A$ . A região compreendida entre duas linhas

vice-versa. Assim, o efeito resultante é uma amplitude nodais é chamada de região ventral. Nela, a água está

nula. Nesse caso, a interferência é destrutiva total. Você oscilando, para cima e para baixo, com variadas amplitudes.

deve desenhar, em casa, as ondas resultantes, nos cinco A fotografia a seguir mostra o padrão de interferência

instantes mostrados anteriormente, para dois pulsos em discutido na figura anterior. concordância de fase.



## INTERFERÊNCIA DE ONDAS



## BIDIMENSIONAIS



Da mesma forma que ocorre com ondas unidimensionais,



as ondas bidimensionais (ou tridimensionais) também sofrem



interferência quando ocorre a superposição dos pulsos,

no Observe que a fotografia mostra seis linhas nodais.  
Na linha



mesmo instante e em cada ponto do meio, gerados por uma central das regiões ventrais, as partes claras correspondem

ou por mais de uma fonte de ondas. a superposições de cristas e as escuras, à superposição de

A figura a seguir mostra duas ondas, geradas por duas vales. Na região ventral, temos a noção do deslocamento

fontes F das ondas no sentido das setas vermelhas. e F , que se propagam na água contida em uma <sub>1 2</sub>

cuba de ondas. Considere que as fontes sejam coerentes, As ondas tridimensionais também apresentam padrão de

ou seja, que elas produzam ondas com a mesma frequência interferência semelhante. A diferença está no fato de que

e em concordância de fase. Assim, o comprimento de onda é elas, por se propagarem nas três dimensões do espaço,

o mesmo para as duas ondas. As linhas cheias e pontilhadas podem formar superfícies nodais (em vez de linhas) e regiões

representam, respectivamente, as cristas e os vales das

ventrais espaciais (e não planas). Devido à dificuldade de

ondas. Considere que as duas ondas foram geradas com a mesma amplitude ( $A$ ).  
mesma amplitude ( $A$ ).

## CONDIÇÕES DE INTERFERÊNCIA

Vamos tratar apenas das interferências construtiva ou destrutiva total. Considere duas fontes  $F_1$  e  $F_2$  emitindo ondas em concordância de fase e que se deslocam pelo meio de

propagação com comprimento de onda ( $\lambda$ ). Essas ondas se superpõem em um ponto  $P$ , como mostra a figura a seguir.

Observe que o ponto  $P$  é atingido, simultaneamente, por duas

$F_1$  cristas e, dessa forma, a interferência é construtiva. Observe  $F_2$  que cada onda percorre uma distância igual a  $4\lambda$  até o ponto  $P$ .

Essa figura mostra um padrão de interferência. Observe Se nesse ponto chegassem a crista de uma das ondas e o

que os pontos pretos indicam posições em que a

interferência vale da outra, a interferência seria destrutiva. Portanto,

é destrutiva total (cristas e vales superpostos). Nesses o que define se num ponto existe interferência construtiva ou

A linha que une tais pontos (linha preta na figura) é chamada cada uma delas até esse ponto. Sejam  $L_1$  e  $L_2$  as distâncias das fontes 1 e 2 até o ponto P, respectivamente. de linha nodal. Em todos os pontos dessas linhas temos, pontos, a todo instante, a amplitude é sempre nula. destrutiva, além da fase da onda, é a distância percorrida por

sempre, uma interferência destrutiva total e, portanto, a

água permanece em repouso. Uma rolha, por exemplo,  $F_1$

colocada em qualquer ponto da linha nodal não oscila, ou seja, existe um padrão ou um modelo para a interferência. P

As bolinhas brancas mostram pontos do meio em que

a interferência é totalmente construtiva (superposições  $F_2$  de crista com crista ou de vale com vale). Nesses pontos,

# Interferência de ondas

Para fontes que geram ondas em concordância de fase, A consequência mais importante dessa experiência foi a

a interferência será: aceitação, por parte dos cientistas da época, de que a luz

1 – Construtiva, se  $|L - L| = n \lambda_{12}$  certas situações, a luz comporta-se como uma onda. Até 2 – Destrutiva, se  $|L - L| = (n + \frac{1}{2}) \lambda_{12}$  então, era considerado que a luz possuía caráter corpuscular.

Para fontes que geram ondas em oposição de fase, Essa diferença será mais bem discutida em Física Moderna.

a interferência será:

Uma outra situação em que acontece o fenômeno de

1 – Construtiva, se  $|L - L| = (n + \frac{1}{2})\lambda_{12}$  interferência da luz, muito interessante, ocorre quando ela

2 – Destrutiva, se  $|L - L| = n\lambda$  incide em películas finas e transparentes. Você já deve ter  $_{12}$

Nessas relações,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  notado que aparecem diversas cores numa bolha de sabão,

num CD ou numa película de óleo, quando iluminados



OBSERVAÇÃO luz branca. Veja como isso acontece.

uma fonte e por outra emitida pela mesma fonte, mas que exemplo, uma fina placa de vidro) iluminada com luz do sofreu uma reflexão com inversão de fase, devemos usar Sol. A luz incidente é parcialmente refletida na superfície Se um ponto é atingido por uma onda que chega direto de Considere uma película de espessura variável (por

as relações de interferência para fontes em oposição de fase. superior e uma outra parte dela, que penetra no vidro, é

refletida pela superfície inferior. Veja a seguir.

## INTERFERÊNCIA COM A LUZ

O físico inglês Thomas Young, em 1800, conseguiu, pela

primeira vez, produzir interferência com a luz. A figura a 1 seguir mostra o esquema da montagem usada por Young e 2 a visão do anteparo que recebe as ondas.

Montagem de Yong de frente Anteparo visto O observador recebe duas ondas que percorrem distâncias

diferentes até o seu olho. Considere a espessura da lâmina, **FÍSICA**

no ponto de incidência, igual a  $d$ . Assim, existe uma diferença

Anteparo de caminhos (igual a  $2d$ ) entre as ondas refletidas 1 e 2 até

chegarem ao observador. Dessa forma, algumas radiações

$\Delta x$   $\Delta x$  sofrem interferência construtiva e outras vão apresentar

$d$  interferência destrutiva. O observador percebe a película

na cor da radiação que apresenta interferência construtiva.

Luz Como a espessura da película é variável, o observador vai

monocromática notar cores diferentes em lugares distintos da película.  $L$

A luz emitida pela fonte de luz monocromática sofre difração

ao passar pelos orifícios e sofre o fenômeno de

interferência **EXERCÍCIO RESOLVIDO**

exibido no anteparo. Observe o padrão de interferência,

constituído por faixas (franjas) claras e escuras. As

franjas **01**. Os alunos de uma escola foram solicitados a repetir a  
claras são regiões onde ocorre interferência  
construtiva, experiência de Young a fim de determinar o  
comprimento

enquanto nas franjas escuras ocorre interferência  
destrutiva. de onda da luz vermelha ( $\lambda = 6,5 \times 10^{-7} \text{ m}$ ). Depois de  
Vamos chamar de  $\Delta x$  a distância entre duas franjas  
claras (ou várias tentativas, eles conseguiram estabelecer medidas

escuras) consecutivas, de  $d$  a distância entre as duas  
fendas e que permitiram calcular o resultado. Eles colaram uma

de  $L$  a distância entre as fendas e o anteparo de  
projeção das fita isolante numa placa de vidro e, com uma lâmina  
de

franjas de interferência. Usando a semelhança de  
triângulos barbear, fizeram dois cortes nessa fita, espaçados por

(não mostrados na figura), é possível provar que: 0,20  
mm. Eles pegaram uma caneta *laser* e direcionaram

$\lambda$  a luz para as fendas obtidas na fita isolante. O anteparo,  $= \Delta$   
 $x.d/L$

onde se formaram as franjas de interferência, foi colocado

Em que  $\lambda$  é o comprimento da luz emitida pela  
lâmpada. a 6,5 m da placa de vidro. Nele, as franjas escuras de

Para realizar essa experiência, é necessário que o  
tamanho interferência destrutiva estavam espaçadas 2,0 cm.

dos orifícios seja muito pequeno e que a distância  $L$   
seja Determinar o valor obtido pelos estudantes para o

muito maior que a distância entre os orifícios onde  
ocorrem comprimento de onda da luz vermelha do *laser*. Calcular a

segunda difração. Medindo-se os valores de  $\Delta x$ ,  $d$  e  $L$ , o erro percentual (EP) cometido pelos estudantes na

é possível determinar o comprimento de onda da luz. medição realizada.

Editora Bernoulli 53

## Frente C Módulo 10

**Resolução:** A partir da análise dessas informações, assinale a

Na montagem de Young, a relação entre a distância do alternativa em que a forma da corda no instante  $t$  está

anteparo ( $L$ ), a distância entre as fendas ( $d$ ), a largura **CORRETAMENTE** representada.

entre as franjas de interferência consecutivas ( $\Delta x$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) é:

$$\lambda = d\Delta x/L \Rightarrow \lambda = (0,02 \text{ cm} \cdot 2,0 \text{ cm})/650 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \lambda = 6,15 \times 10^{-5} \text{ cm} \Rightarrow \lambda \cong 6,2 \times 10^{-7} \text{ m}$$

A diferença entre o valor correto e o valor medido é: B) D)

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_M = 6,5 \times 10^{-7} \text{ m} - 6,2 \times 10^{-7} \text{ m} = 0,3 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Assim, o erro percentual (EP) foi de:

$$0 \ 20 \ 40 \ 60 \ 80 \ 100 \ 120 \ 140 \ 0 \ 20 \ 40 \ 60 \ 80 \ 100 \ 120 \ 140$$

$$EP = (\Delta \lambda / \lambda) 100\% = 4,6\%$$

**03.** (UEL-PR-2010) A figura a seguir representa uma área coberta pela radiação eletromagnética emitida por duas

# EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO antenas.

Considerando que a radiação eletromagnética

é uma onda e que, nesta questão, essa onda está

**01.** (UFMG) A figura mostra pulsos produzidos por Breno e traços cheios e os vales, os traços pontilhados, assinale representada pelos semicírculos, cujas cristas são os

Tomás nas extremidades de uma corda. O pulso produzido a alternativa **CORRETA**.

por Breno tem maior amplitude que o produzido por Tomás.

As setas indicam os sentidos de seus movimentos. Assinale

a alternativa que contém a **MELHOR** representação dos

pulsos, logo depois de se encontrarem.

1

4

2

3

Breno Tomás

A) C) A) No ponto 1, a amplitude resultante é mínima.

B) No ponto 2, a amplitude resultante é máxima.

C) No ponto 3, a amplitude resultante é metade do que

a  
do  
ponto  
1.

B) D)

D) No ponto 4, a amplitude resultante é nula.

E) No ponto 2, a amplitude resultante é o dobro do que

**02.** (UFMG–2010) Na figura I, estão representados os pulsos a do ponto 3.

P e Q, que estão se propagando em uma corda e se

**04.** (UFRGS) Em um tanque de ondas, duas fontes F e F

aproximam um do outro com velocidades de mesmo módulo. <sup>1 2</sup>

oscilam com a mesma frequência e sem diferença de

Na figura II, está representado o pulso P, em um instante t,

posterior, caso ele estivesse se propagando sozinho. fase, produzindo ondas que se superpõem no ponto P,

como  
mostra  
a  
figura:

F<sub>1</sub> P

Pulso P Pulso Q

F<sub>2</sub>

0 20 40 60 80 100 120 140

Figura I A distância entre F<sub>1</sub> e P é de 80 cm e entre F<sub>2</sub> e P é de

85 cm. Para qual dos valores de comprimento de onda

das ondas produzidas por F e F ocorre um mínimo <sup>1 2</sup> de intensidade (interferência destrutiva) no ponto P?

Pulso P, no instante t A) 1,0 cm

B)  
2,5  
cm  
  
C)  
5,0  
cm

0 20 40 60 80 100 120 140 D) 10 cm

Figura II E) 25 cm

## 54 Coleção Estudo

# Interferência de ondas

**05.** Uma fonte puntual, localizada em P, emite luz **03.** Três pulsos, A, B e C, são produzidos em uma corda

monocromática em direção às barreiras. Os pontos A, B e C esticada, que tem uma extremidade fixada numa parede,

encontram-se no anteparo e são os pontos centrais de e se deslocam conforme a figura. Quando os pulsos se

regiões de interferência construtiva consecutivas. As fendas superpuserem, após reflexão na parede, ocorrerá

são da ordem de grandeza do comprimento de onda da

luz. Assim, é **CORRETO** afirmar que a relação entre x e y é B

C C A

y

P B A) três interferências, nessa ordem, construtiva, X construtiva e destrutiva.

A

B) três interferências, nessa ordem, construtiva, destrutiva e construtiva.

C) quatro interferências, nessa ordem, construtiva, destrutiva, construtiva e destrutiva.

A)  $x = y$ .

B)  $x > y$ . destrutiva, construtiva e destrutiva. D) quatro interferências, nessa ordem, construtiva,

C)  $x < y$ .

D) um valor que depende da frequência da luz incidente. **04.** (UFMG) Duas ondas idênticas são produzidas, ao mesmo tempo, numa corda elástica onde se propagam com velocidades constantes.

## EXERCÍCIOS PROPOSTOS <sub>v</sub>

**01.** <sub>v</sub> (UDESC-SC-2006) Dois pulsos, A e B, são produzidos em

uma corda esticada que tem uma das extremidades fixada. As figuras a seguir (PQRS) mostram a forma das ondas

em uma parede, conforme mostra a figura a seguir, em instantes posteriores ao inicial. A ordem com que tais

figuras se formaram é

A B P) R)



Depois de o pulso A ter sofrido reflexão no ponto da corda fixo na parede, ocorrerá interferência entre os dois pulsos. É **CORRETO** afirmar que a interferência entre esses dois pulsos é A) PSQR. C) QRSP. E) SPQR.

B) QPSR. D) PSRQ.

A) destrutiva e, em seguida, os pulsos seguirão juntos,

**no sentido do pulso de maior energia. 05.** (UFV-MG) Um aparelho de rádio (R) recebe simultaneamente

B) destrutiva e, em seguida, cada pulso seguirá seu os sinais direto e refletido em uma camada atmosférica,

caminho, mantendo suas amplitudes originais. provenientes de uma emissora (E). Quando a camada está

a uma altura (H), o sinal é forte; à medida que a camada

C) construtiva e, em seguida, os pulsos seguirão juntos,

se desloca verticalmente a partir dessa posição, o sinal no sentido do pulso de maior energia.

enfraquece gradualmente, passa por um mínimo e recupera

D) construtiva e, em seguida, cada pulso seguirá seu gradativamente o valor inicial. Este fenômeno se deve à

caminho, mantendo suas amplitudes originais.

Camada atmosférica

E) destrutiva e, em seguida, os pulsos deixarão de existir,

devido à absorção de energia durante a interação.

H

**02.** R E (Cesgranrio) A figura mostra dois pulsos que se propagam

em sentidos contrários ao longo de uma corda. Qual das

opções a seguir representa uma configuração A) interferência, entre os sinais direto e refletido, **POSSÍVEL**,

construtiva quando o sinal for máximo e destrutiva quando os pulsos se cruzam?

quando o sinal for mínimo.

B) difração, pois a facilidade para o sinal contornar a camada é função da altura.

A) C) absorção do sinal pela camada, que depende da sua C) altura em relação à Terra.

D) variação do índice de reflexão da camada, o que é

B) D)

uma função da altura.

Editora Bernoulli 55

## Frente C Módulo 10

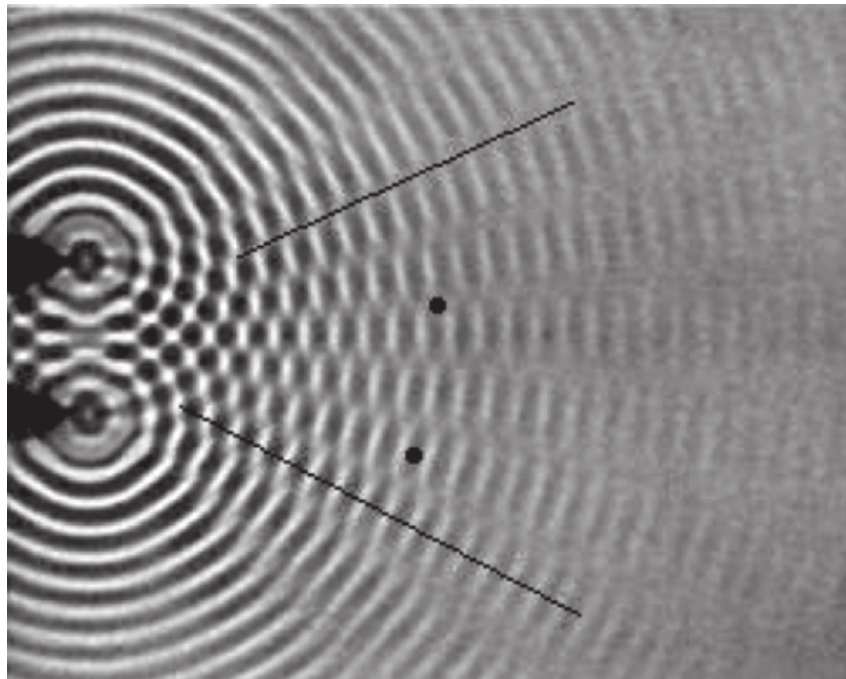
**06.** (FCMMG–2009) A foto mostra duas fontes vibrantes **08.** (UECE–2008) Na figura a seguir, C é um anteparo e

produzindo ondas na superfície da água com a mesma S, S e S são fendas nos obstáculos A e B. <sub>0 1 2</sub>

frequência e destacando alguns elementos característicos

da interferência dessas ondas.

Máx.



Máx.

Máx.

Onda

incidente Máx.

$S_2$  Máx.

Máx.

$S$  Máx. o

Máx.

$S$  Máx.

1

Máx.

Máx.

Máx.

Máx.

Pode-se afirmar que, na foto,

A) o ponto inferior representa um nó. Assinale a alternativa que contém os fenômenos ópticos

esquemáticos na figura.

B) o ponto superior representa um ventre.

A)  
Reflexão  
e  
difração

C) a linha superior representa uma linha nodal.

B) Difração e interferência

D) a linha inferior representa uma linha com interferência

C) Polarização e interferência

destrutiva.

D) Reflexão e interferência

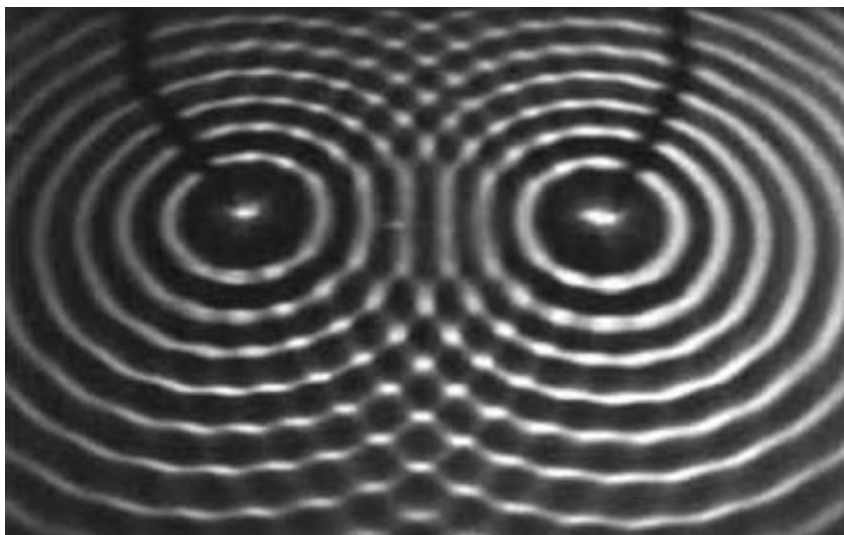
**07.** (UNESP–2009) A figura mostra um fenômeno ondulatório

produzido em um dispositivo de demonstração chamado **09.** (UFC)  
Duas ondas ocupam a mesma região no espaço

e têm amplitudes que variam com o tempo, conforme o  
tanque de ondas, que, neste caso, são geradas por dois

gráfico  
a  
seguir.

martelinhos que batem simultaneamente na superfície da  
água 360 vezes por minuto. Sabe-se que a distância entre A  
dois círculos consecutivos das ondas geradas é 3,0 cm.



t

Assinale a alternativa que contém o gráfico resultante da soma dessas duas ondas.

A) A D) A

t t

Pode-se afirmar que o fenômeno produzido é a B) A E) A

A) interferência entre duas ondas circulares que se propagam com velocidade de 18 cm/s. t t

B) interferência entre duas ondas circulares que se propagam com velocidade de 9,0 cm/s.

C) interferência entre duas ondas circulares que se propagam com velocidade de 2,0 cm/s. C) A

D) difração de ondas circulares que se propagam com  
velocidade de 18 cm/s. t

E) difração de ondas circulares que se propagam com  
velocidade de 2,0 cm/s.

## 56 Coleção Estudo

# Interferência de ondas

**10.** (UFSCar-SP) Dois pulsos, A e B, são produzidos em uma **13.**  
(UFC) Duas fontes,  $S_1$  e  $S_2$ , emitem ondas sonoras,

corda esticada, que tem uma extremidade fixada numa em fase, com  
a mesma amplitude,  $Y$ , e o mesmo

comprimento de onda,  $\lambda$ . As fontes estão separadas por  
parede, conforme mostra a figura.

uma distância  $d = 3\lambda$ . Considere que a amplitude  $Y$  não varia.

$S_1$   $S_2$  P

$d = 3\lambda$

A amplitude da onda resultante, no ponto P, é

Pulso B Pulso A A)  $4Y$ .

B)  
 $2Y$ .

Quando os dois pulsos se superpuserem, após o pulso

C)  
0.

A ter sofrido reflexão na parede, ocorrerá interferência

D)  
Y.

A) construtiva e, em seguida, os dois pulsos seguirão

E)  
Y/2.

juntos no sentido do pulso de maior energia.

B) construtiva e, em seguida, cada pulso seguirá seu **14.** (UNITAU-SP) Nos pontos A e B da figura a seguir, estão

caminho, mantendo suas características originais. e em fase. Se a frequência for crescendo desde cerca de dois alto-falantes que emitem sons de mesma frequência

C) destrutiva e, em seguida, os pulsos deixarão de existir, 30 Hz, atingirá um valor em que o observador deixa de

devido à absorção da energia durante a interação. ouvir o som. Qual é essa frequência? (Velocidade do som

no ar = 340 m/s)

D) destrutiva e, em seguida, os dois pulsos seguirão



juntos no sentido do pulso de maior energia.

E) destrutiva e, em seguida, cada pulso seguirá seu

A B

caminho, mantendo suas características originais.

**11.** 1 m (UFTM-MG) Sobre o fenômeno da interferência, pode-se

afirmar que **FÍSICA**

A)  
70  
Hz

A) só ocorre com ondas mecânicas e longitudinais.

B)  
120  
Hz

B) as linhas ventrais indicam interferência destrutiva.

C)  
170  
Hz

C) num ponto do meio para o qual  $\Delta x = n\lambda/2$ , ocorre D) 340 Hz  
interferência construtiva.

D) não é apropriado para demonstrar o caráter **15.** (PUCPR) Um observador, situado no ponto O, recebe ondas

sonoras emitidas por duas fontes situadas nos pontos A e B,  
ondulatório da luz.

idênticas, que emitem em oposição de fase.

E) pode ocorrer a situação na qual som + som = silêncio.

A 20 m O

**12.** (UEM-PR-2006) Em uma danceteria, são instalados

em paredes opostas dois alto-falantes que emitem 25 m  
ondas sonoras iguais. É possível, estando os dois



alto-falantes ligados, haver pontos na sala com silêncio,  
ou seja, com intensidade do som igual a zero?

B

A) Não, pois, com dois alto-falantes a intensidade do  
som é duplicada. A velocidade de propagação do som emitido pelas  
fontes

B) Sim. Devido ao fenômeno da refração, nos pontos é de 340 m/s e a frequência é de 170 Hz. No ponto O, ocorre interferência onde houver a superposição da crista de uma onda e A) destrutiva e não se ouve o som emitido pelas fontes. o vale da outra onda, haverá silêncio.

B) construtiva e a frequência da onda sonora resultante

C) Não, devido ao fenômeno da dispersão.

será de 170 Hz.

D) Sim. Devido ao fenômeno da interferência, nos pontos C)  
construtiva e a frequência da onda sonora resultante

onde houver uma superposição da crista de uma onda será  
de 340 Hz.

e o vale da outra onda, haverá silêncio. D) construtiva e a frequência  
da onda sonora resultante

E) Sim. Devido ao fenômeno da polarização, nos pontos será de 510  
Hz.

onde houver uma superposição do vale de uma onda E) destrutiva e a  
frequência da onda sonora nesse ponto

e o vale da outra onda, haverá silêncio. será de 340 Hz.

# Frente C Módulo 10

## SEÇÃO ENEM 02. (Enem-2010) As ondas eletromagnéticas, como a luz

visível e as ondas de rádio, viajam em linha reta em um meio homogêneo. Então, as ondas de rádio emitidas

**01.** As cores que percebemos nos objetos dependem, na região litorânea do Brasil não alcançariam a Região

basicamente, de dois fatores: das cores dos pigmentos Amazônica do Brasil por causa da curvatura da Terra.

que compõem o objeto propriamente dito e da luz que o Entretanto, sabemos que é possível transmitir ondas

ilumina. Considere um objeto que possua pigmentação de rádio entre essas localidades devido à ionosfera.

exclusivamente vermelha, por exemplo. Se for iluminado Com a ajuda da ionosfera, a transmissão de ondas planas

por luz que contenha a radiação vermelha, seja uma luz entre o litoral do Brasil e a Região Amazônica é possível

branca ou uma monocromática vermelha, por exemplo, por meio da

o objeto vai ser visto na sua própria cor, ou seja, vermelho. A) reflexão. D) polarização.

Se esse objeto for iluminado por qualquer luz que não B) refração. E) interferência.

tenha a radiação vermelha, ele será visto na cor preta. C) difração.

O pavão é uma ave que apresenta as penas da cauda

**03.** (Enem-2010) Um garoto que passeia de carro com seu

com uma profusão fantástica de cores e formas. Na

pai pela cidade, ao ouvir rádio, percebe que a sua estação

época do acasalamento, ele fica saltitando de um lugar de rádio preferida, a 94,9 FM, que opera na banda de

para o outro, balançando as plumas e as penas da sua frequência de megahertz, tem seu sinal de transmissão

calda para atrair a fêmea. As figuras a seguir mostram superposto pela transmissão de uma rádio pirata, de

um pavão e, no detalhe, os ocelos que compõem a sua mesma frequência, que interfere no sinal da emissora

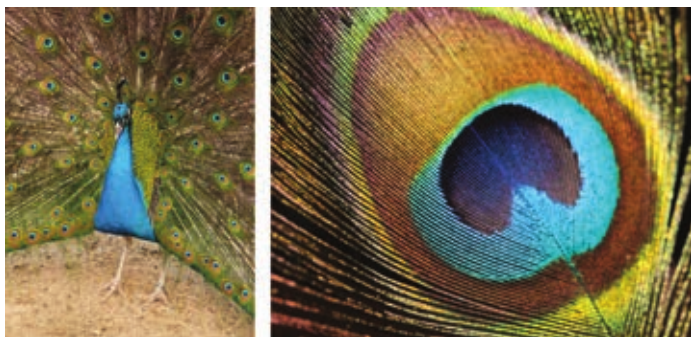
cauda. Nessa espécie de ave, as cores predominantes do centro em algumas regiões da cidade.

na cauda são o verde, o azul, o alaranjado e o amarelo,

Considerando a situação apresentada, a rádio pirata

todas em diversas tonalidades.

interfere no sinal da rádio do centro devido à



A) atenuação promovida pelo ar nas radiações emitidas.

B) maior amplitude da radiação emitida pela estação do

centro.

C) diferença de intensidade entre as fontes emissoras

de

D) maior potência de transmissão das ondas da emissora

sxc pirata.

E) semelhança dos comprimentos de onda das radiações

Considere esse pavão num local sem iluminação natural.

emitid

Caso ele seja iluminado com luz branca todas as cores

mostradas serão vistas. Entretanto, se ele for iluminado

com qualquer luz monocromática, a sua cauda vai se

## GABARITO

mostrar preta. Ou seja, nenhuma das cores vai aparecer

e toda a sua beleza desaparece.

Marque a alternativa que mais bem explica o fato **Fixação**

mostrado. 01. C 02. D 03. B 04. D 05. A

A) As penas da cauda do pavão não possuem pigmentos

**coloridos e as cores que  
aparecem, quando**

**iluminadas** Propostos com luz branca,  
surgem por efeito da difração da luz

nos espaços das suas plumas. 01. B 09. C

B) As penas da cauda do pavão não possuem pigmentos 02. B 10. E

coloridos e as cores que aparecem, quando iluminadas 03.

B 11. E com luz branca, surgem por efeito da interferência da

04. B 12. D

luz nos espaços das suas plumas.

C) As penas da cauda do pavão não possuem pigmentos 05. A 13. B

coloridos e as cores que aparecem, quando iluminadas 06.  
C 14. C

com luz branca, surgem por efeito da refração e da 07. A  
15. B reflexão da luz nas suas plumas.

08.  
B

D) Apesar de as penas da cauda do pavão apresentarem

**todos os pigmentos coloridos,  
quando elas são** Seção Enem  
iluminadas por qualquer luz monocromática, a

interferência destrutiva faz com que a cauda se 01. B 02. A  
03. E mostre preta.

**58** Coleção Estudo

**FÍSICA MÓDULO FRENTE**

**Cargas em movimento em 13 D**  
**campo magnético**

Anteriormente, estudamos o campo magnético, que posicionamos a mão direita para determinar o sentido da

caracteriza as propriedades do espaço em torno de um força magnética sobre a carga naquela situação. Você deve

ímã ou de um fio percorrido por uma corrente elétrica, por orientar o polegar no sentido da velocidade da carga e os

exemplo. Vimos, ainda, que um ímã atrai um pedaço de ferro demais dedos devem ficar estendidos no sentido do campo

porque este fica magnetizado. Sabemos, assim, que ímãs magnético. Feito isso, a palma da mão fica virada para cima,

exercem forças uns sobre os outros através da interação como mostrado. O sentido da força magnética atuante na

dos seus campos magnéticos. carga é obtido por meio de um tapa dado pela **palma** da

mão, se a carga for **positiva**. Para as cargas **negativas**,

Conhecemos o fato de que uma carga elétrica **em**

o tapa deverá ser dado com as **costas** da mão.

**movimento** cria um campo magnético no espaço ao seu redor. Assim, uma carga elétrica em movimento,

em uma O módulo da força magnética é calculado pela equação:

região onde há um campo magnético, pode sofrer ação de

uma força magnética devido a esse campo. É o que vamos  $F = Bqv \cdot \sin \theta$  discutir agora.

Na expressão,  $B$  é o módulo do campo magnético,  $q$  e  $v$

são os valores da carga e da velocidade da partícula e

**FORÇA SOBRE UMA CARGA**  $\theta$  é o ângulo formado entre o vetor velocidade e o vetor campo

magnético. Veja os gráficos de como varia o módulo da força

**ELÉTRICA EM MOVIMENTO EM** magnética ( $F$ ), mantendo as demais variáveis constantes,

em função do campo ( $B$ ), da carga ( $q$ ), da velocidade ( $v$ ) e

**UM CAMPO MAGNÉTICO** do ângulo ( $\theta$ ).

A figura seguinte mostra uma carga elétrica positiva (q)

penetrando em uma região na qual existe um campo magnético. Observe que o campo magnético (B) e a velocidade da carga (v) formam um ângulo ( $\theta$ ) entre si e estão no mesmo plano ( $\alpha$ ). A carga, ao penetrar na região

em que há o campo, sofre a ação de uma força magnética  $F_m$  ou  $q v B \sin \theta$  ( $^\circ$ ) que a obriga a descrever uma curva.

A seguir, apresentamos três aspectos importantes sobre

a força magnética.  $F_m$

1. Pela equação, percebemos que a força magnética

$F_m$  pode ser **nula** em quatro situações.

$$q B v \sin \theta = 0$$

$\alpha$   $v \perp B$   $\Rightarrow F_m = 0$  (não existe força magnética sem campo magnético);

A experiência nos mostra que:

•  $q = 0$  (campo magnético não interage com





$F \Rightarrow$  partículas que não estejam eletrizadas);  
 $F \perp \alpha \perp B$  e  $F \perp v_{mm} \cdot v = 0$  (campo magnético não interage com



Dessa forma, a direção da força magnética está  
 partículas em repouso);



determinada (perpendicular ao plano  $\alpha$ ). O sentido  $\cdot \theta = 0^\circ$  ou  $\theta = 180^\circ$  (campo magnético dessa força pode ser encontrado a partir de uma regra não interage com partículas que se movem

prática, conhecida por **regra do tapa**. Na figura anterior, paralelamente a ele).

Editora Bernoulli 59

## Frente D Módulo 13

2. Se a velocidade da carga é perpendicular às linhas de Veja que a palma da mão fica voltada para a parte inferior

indução magnética, temos  $\theta = 90^\circ$  e o valor do seno da folha de papel. Esse é o sentido da força magnética ( $F$ )

será máximo e igual a 1 (veja os gráficos anteriores). que atua sobre a carga positiva naquela posição. De acordo

Assim, a força magnética será **máxima** e de módulo com a 3ª Lei de Newton, a força sobre o fio aponta para a

F parte superior da folha. =  $Bqv_m$

3. De acordo com a regra do tapa, a força magnética  $F$  é perpendicular ao plano  $I \times v \times \alpha$  (formado pelos vetores  $B$  e

$v$  e  $B$ ). A força magnética, sendo perpendicular  $q$  + ao movimento da carga, não altera o módulo da  $v$

velocidade e nem a energia cinética da partícula.  $F$  A força magnética altera apenas a direção e o sentido  $F$  do vetor velocidade.

Uma vez que a força magnética sobre a carga aponta para baixo, a tendência dessa carga é deslocar-se nesse

## INTERAÇÃO ENTRE CARGA E

sentido, afastando-se do fio (veja a trajetória pontilhada na figura anterior).

## CORRENTE ELÉTRICA

# O fato de uma corrente elétrica criar linhas de indução

## MOVIMENTO DE UMA CARGA

magnética no espaço ao seu redor e o de uma carga elétrica

em movimento poder sofrer a ação de uma força exercida

## EM UM CAMPO MAGNÉTICO

pelo campo magnético nos leva a uma aplicação importante. **UNIFORME** Vamos usar a regra da mão direita e, depois, a regra do tapa

para investigar a interação entre carga elétrica em Em todas as situações a seguir, vamos desprezar o peso da movimento e corrente elétrica. partícula. Dependendo da velocidade inicial da carga ( $v$ ) e do  $\theta$

Veja, a seguir, um exemplo. Um fio longo, colocado no ângulo ( $\theta$ ) entre a velocidade e as linhas do campo magnético,

plano da folha de papel, é percorrido por uma corrente o movimento da partícula no campo pode ser de quatro tipos.

elétrica ( $I$ ). Uma carga puntiforme ( $q$ ) positiva, por exemplo,

é lançada com velocidade ( $v$ ) paralelamente ao fio.

# Vamos Partícula colocada em repouso

determinar a força que existe entre os dois – carga e fio. em uma região onde há um campo

$\mathbf{B}$  magnético ( $v = 0$ )

0

A força é dada por  $F = Bqv \cdot \sin \theta$ . Se  $v = 0 \Rightarrow F = 0$ .

Logo, a partícula permanece em repouso na posição em que

$v$  foi colocada no campo magnético.

Primeiro, vamos determinar o campo magnético produzido Partícula lançada paralelamente à

a regra da mão direita (dedão no sentido da corrente e girando linha de campo magnético ( $v$  pela corrente, na região em que a carga se movimenta.

Usando  $\mathbf{B}$  )

a mão em torno do fio), descobrimos que o campo na parte A força é  $F = Bqv \cdot \sin \theta$ . Para  $\theta = 0^\circ$  ou  $\theta = 180^\circ$ , a força de baixo do fio sai da folha de papel.

Veja a figura seguinte. magnética vale zero ( $\sin 0^\circ = \sin 180^\circ = 0$ ). Por isso, uma

partícula lançada paralelamente às linhas de indução  
magnética

descreve, de acordo com a 1ª Lei de Newton, um  
movimento

I retilíneo uniforme no sentido do movimento inicial.

## I Partícula lançada

+ v B perpendicularmente à linha de

B q

Agora, vamos usar a regra do tapa sobre a carga.

Aponte **campo magnético** ( $v \perp B$ ) o

os quatro dedos no sentido do campo magnético  
(sentido A figura a seguir representa uma partícula,  
carregada

dos seus olhos) e o dedão no sentido da velocidade da  
**negativamente**, penetrando em uma região na qual  
carga (para a direita). o campo magnético é  
perpendicular à sua velocidade.

# Cargas em movimento em campo magnético

Indicamos o sentido da força magnética sobre a partícula em Você sabe, da Química, que o cloro tem dois isótopos principais –

alguns pontos da sua trajetória circular (**regra do tapa** com  $^{35}\text{Cl}$  e  $^{37}\text{Cl}$  – e que uma amostra de cloro tem massa as costas da mão). Para  $\theta = 90^\circ$ , o movimento da partícula atômica média, aproximada, de 35,5 u. Mas como os

será circular e uniforme, uma vez que a força magnética químicos descobriram isso? Usando um aparelho chamado

que atua sobre ela exerce o papel de força centrípeta e não espectrômetro de massa, cujo funcionamento é muito simples.

altera o módulo da velocidade.

Considere uma amostra de cloro com partículas ionizadas

x positivamente, com a mesma carga ( $q$ ). Ao serem lançadas, x x x x B perpendicularmente, com a mesma velocidade ( $v$ ), em uma

x x  $v_0$  x x x região na qual atua um campo magnético uniforme ( $B$ ), elas

descrevem trajetórias circulares conforme mostrado a

seguir.

x x x x x

—

$x \ v \ F_m \ B_0 \ x \ x \ x \ x$

R

x x x x x

— —  $R_{37} \ F \ V_m \ F_{m0} \ R \ V_{350}$

O raio da trajetória pode ser determinado igualando-se a

equação da força magnética com a expressão que fornece  $F$  Chapa sensível<sub>m</sub>

o módulo da força centrípeta:  $F = F_{mC}$  A força magnética que atua sobre todas as partículas



$Bqv \cdot \sin 90^\circ$  é a mesma ( $F = Bqv$ ). O raio da trajetória de cada um  $2m_0 \ mv_0 \Rightarrow \theta = 0$  R dos isótopos, porém, é diferente ( $R \propto m$ ). Os isótopos são  $= R \ Bq$  detectados numa chapa sensível à colisão de cada um deles.

completa se ela for lançada do interior da região em que há o A partícula só pode descrever uma trajetória circular Revelando a chapa e medindo a densidade de colisões em cada ponto, é possível detectar a quantidade de cada um dos isótopos. Assim, fazendo uma média ponderada das massas **FÍSICA** campo magnético. A figura a seguir mostra um elétron e um dos isótopos, conclui-se que a massa atômica aproximada próton lançados do interior de uma região onde há um campo do cloro é 35,5 u. magnético uniforme, com velocidades de mesmo módulo.

Veja o mapa comparativo entre os movimentos de uma carga positiva em campos elétrico e magnético uniformes.

B

Movimento de uma carga **positiva** em um campo uniforme

$F_m$   $F_m$  **Elétrico Magnético**

$v$   $v_0$   $+0$   $-$

eles tenham o mesmo módulo, as trajetórias têm raios diferentes Observe que, embora as forças magnéticas que atuam sobre M.R.U.A. no  $v = 0$  Repouso sentido



do campo por causa da diferença entre as massas ( $R \propto m$ ). O período

do movimento ( $T$ ) de cada um deles pode ser calculado por:  $v \neq 0$  M.R.U.A. M.R.U. e no sentido de  $v$  no sentido de  $v$   $R \cdot \theta = 0^\circ$   $2 \pi$   $2 m \pi R B q m v = \rightarrow R B q m = \rightarrow T = \cdot T B q v \neq 0$  M.R.U.R. M.R.U. Observe que o período não depende do raio da trajetória e no sentido de  $v$  no sentido de  $v$  e nem da velocidade da partícula. Ele vai depender, apenas,  $\theta = 180^\circ$  da razão massa/carga dessa partícula.

As trajetórias circulares descritas por partículas lançadas Movimento  $v \neq 0$

em uma região na qual há um campo magnético uniforme parabólico e M.C.U. apresentam uma aplicação prática muito interessante. acelerado  $\theta = 90^\circ$

Editora Bernoulli 61

## Frente D Módulo 13

### EXERCÍCIO RESOLVIDO $v \cdot v_y$

**01.** Prótons (p), nêutrons (n) e elétrons (e), todos com a mesma velocidade, são lançados perpendicularmente a  $v_x$  q um campo magnético uniforme e descrevem as trajetórias mostradas a seguir. Identificar cada partícula com as

trajetórias I, II e III.

B

I

B Conforme discutido anteriormente, a componente v  
gera

n p um movimento retilíneo uniforme, enquanto a componente  $v_y$   $v_o$  proporciona um movimento circular uniforme. A combinação II

e desses dois movimentos corresponde a um movimento

helicoidal uniforme. Esse é exatamente o tipo de movimento

descrito por um ponto na hélice de um avião que se move

III em linha reta e com velocidade constante.

**Resolução:** Dois dos fenômenos atmosféricos mais bonitos, que ocorrem próximos aos polos da Terra, são as auroras

O nêutron não tem carga elétrica ( $q = 0$ ). Ele não sofre boreal e austral (polos norte e sul, respectivamente).

ação da força magnética e, portanto, não se desvia. Logo, Elas acontecem porque partículas carregadas, vindas do

o nêutron segue a trajetória II. espaço (principalmente do Sol), atingem a Terra em altas

Uma vez que o sentido do campo é conhecido (saindo da velocidades e obliquamente ao campo magnético

terrestre.

página), podemos usar a regra do tapa (com os dedos Dessa forma, elas ficam “aprisionadas” dentro desse campo,

no sentido do campo magnético e o dedão no sentido da descrevendo trajetórias helicoidais, como mostrado na figura

velocidade). Feito isso, percebemos que sobre o próton anterior. Uma vez que o campo da Terra é mais intenso

atua uma força magnética para baixo (trajetória III) próximo aos polos, tais partículas (chamadas de raios

e sobre o elétron atua uma força magnética para cima – cósmicos) são deslocadas para os polos, segundo a trajetória

tapa com as costas da mão (trajetória I). helicoidal. Lá, por diversos motivos, que não são relevantes

Mesmo sem conhecer o sentido do campo, podemos saber aqui, elas colidem com átomos presentes na alta atmosfera,

qual é a trajetória do próton e qual é a trajetória do elétron fazendo com que eles emitam luzes coloridas que “dançam”

pelo raio da curva descrita por cada um. Sabemos que o nos céus, como se fossem fantasmas multicoloridos e bem

raio da trajetória circular é dado por  $R = mv/(Bq)$ . Como animados. Os povos da Antiguidade creditavam essas “luzes

ele é proporcional à massa ( $R \propto m$ ), o próton descreve a do céu” a manifestações divinas.

trajetória III (maior raio) e o elétron, a trajetória I (menor



raio), porque a massa do próton é, aproximadamente,

1 840 vezes maior que a massa do elétron.

Temos, ainda, outra solução para a nossa dúvida anterior.

Você sabe, da Mecânica, que a aceleração é inversamente proporcional à massa. A força magnética é a mesma para as duas partículas, e o valor da velocidade é constante.

A aceleração que atua no elétron é a aceleração centrípeta

( $a = v^2/R$ ). Como a aceleração do elétron é maior (menor  $c$

massa), ele deve descrever a trajetória de menor raio –

trajetória I.  $c$



## Partícula lançada obliquamente às linhas de campo

Para  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  ou  $90^\circ < \theta < 180^\circ$ , a trajetória da

partícula será uma hélice cilíndrica. Podemos entender o

porquê dessa trajetória se lembrarmos que a velocidade da <sup>e Commons</sup> partícula, nesses casos, é oblíqua em relação às linhas do

campo magnético. Vamos decompor a velocidade em duas

componentes, uma paralela às linhas de indução do campo

magnético ( $v_{\parallel}$ ) e a outra perpendicular a essas linhas ( $v_{\perp}$ ). X Y Samuel Blanc / Creativ

## Cargas em movimento em campo magnético

Os raios cósmicos vindos do espaço são mais frequentes

quando o Sol tem a sua atividade mais acentuada.  $M_N$   
Em determinadas épocas do ano, as manchas solares (regiões  $E$  onde ocorrem explosões muito intensas, gerando uma

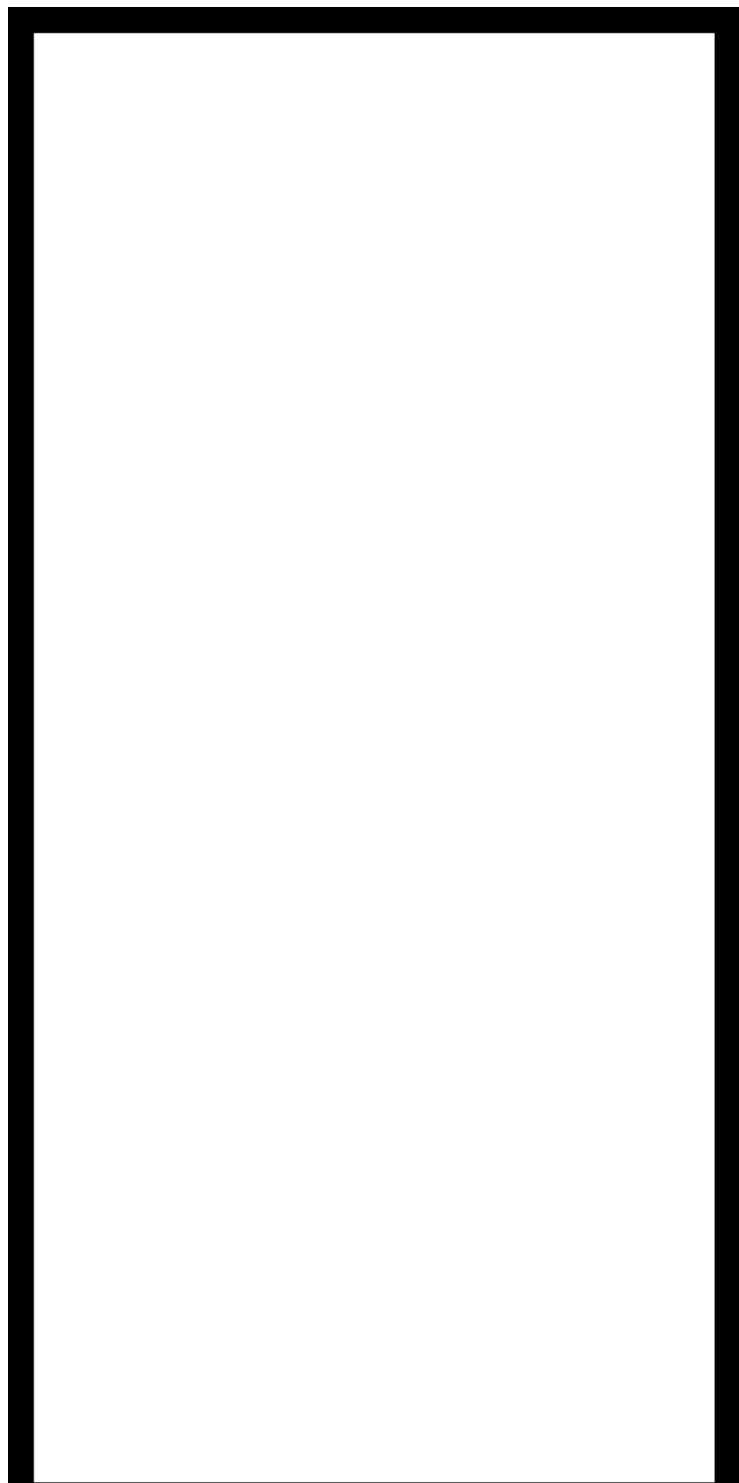
enorme quantidade de energia e de partículas eletrizadas)

estão mais impetuosas. Nesse período, a quantidade de  $B$  raios cósmicos que vem em direção à Terra é muito grande.

Eles podem interferir no funcionamento de diversos  $A$  aparelhos eletrônicos. Dessa forma, o campo magnético

terrestre serve de escudo contra tais partículas, aprisionando

ou expulsando a maioria delas e protegendo o nosso planeta.  $E$





# LEITURA COMPLEMENTAR A

partícula eletrizada é abandonada no ponto A da figura anterior (parte central do ciclotron). Ela é acelerada pelo campo

**O ciclotron e suas aplicações** elétrico (de N para M) e, a seguir, entra no “D” esquerdo com

certa velocidade. O campo magnético deflete a partícula num

O ciclotron é um aparelho usado para acelerar cargas semicírculo de raio pequeno. Ela é novamente acelerada pelo

elétricas de modo a obter partículas eletrizadas com altas campo elétrico e penetra no “D” da direita com velocidade

velocidades e, portanto, com energias elevadas. O aparelho de maior módulo. O campo elétrico é ajustado de forma que

foi desenvolvido em 1932, na Universidade da Califórnia. a partícula sempre o encontra no sentido de sua velocidade

Ele é formado por duas câmaras metálicas ocas, dentro das quais (assim, o módulo da velocidade estará sempre aumentando ao

é feito um vácuo parcial. Essas regiões têm o formato de dois passar de um “D” para o outro). Dessa forma, o raio da trajetória

“D” invertidos um em relação ao outro. A figura a seguir mostra aumenta. A trajetória total da partícula está representada pela

um ciclotron de forma simplificada. linha pontilhada vermelha. Depois de várias “voltas” (muitas vezes,

centenas delas) dentro dos “dês”, a partícula sai, com enorme

B energia, pela fresta (F) e atinge alvos específicos e devidamente

escolhidos (núcleos a serem “bombardeados” pelas partículas).

## FÍSICA

O ciclotron foi muito usado na pesquisa de Física das

Partículas, uma vez que ele permitia obter íons com velocidades muito elevadas. Tais íons colidindo contra núcleos de átomos produziam as partículas mais elementares da natureza, o que permitiu um grande desenvolvimento da Física e da tecnologia.

- + O principal fator que determina a energia (velocidade) da  $v$  partícula ao sair do ciclotron é o tamanho deste e, portanto, o custo dos eletroímãs que têm de existir em todo o seu raio.

O seu funcionamento está baseado em três consequências Além desses fatores, à medida que a velocidade da partícula

do movimento de cargas elétricas em regiões onde há campos aumenta e atinge um valor relevante comparado à velocidade

elétrico e magnético, a saber: da luz, conceitos ligados à Teoria da Relatividade mostram que

1. a massa inercial do íon aumenta e, por consequência, cresce Uma carga elétrica sofre ação de uma força elétrica

exercida por um campo elétrico na mesma direção o tempo que ele gasta em cada volta. Assim, o ciclotron perde desse campo; o sincronismo e, acima de determinado valor de velocidade, não consegue mais acelerar a partícula. Por esses motivos,

2. Uma carga elétrica em movimento perpendicular às

o ciclotron deixou de ser usado em pesquisa avançada de Física linhas de indução de um campo magnético descreve uma e foi substituído por seus sucessores, entre eles, o síncrotron. trajetória circular no interior da região desse campo;

O ciclotron, hoje, é muito utilizado para produzir isótopos

3. O período do movimento citado (tempo de cada volta)

radioativos usados na detecção e no tratamento de diversas não depende do raio da trajetória e nem da velocidade doenças. Infelizmente, o número de aparelhos usados com da partícula, conforme já explicado. Ele vai depender esse objetivo no Brasil é limitado. O ciclotron está sendo apenas da razão massa/carga dessa partícula.

usado, recentemente, no Hospital das Clínicas da USP, para

O campo magnético está restrito à região central dos a produção de prótons de altas energias que são lançados

“dês” e é perpendicular à sua superfície. O campo elétrico diretamente contra tecidos com diversos tipos de câncer.

existe apenas entre as partes planas dos “dês” (entre M e N, O país está se preparando para uma nova área de pesquisa

mostradas a seguir). Tais campos são uniformes. médica, ou seja, a Medicina ressuscitou o ciclotron.

Editora Bernoulli 63

## Frente D Módulo 13

# EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO<sub>K</sub>

M



01. N (UFMG) Um feixe de elétrons entra em uma região na



qual existe um campo magnético, cuja direção coincide



L



com a direção da velocidade dos elétrons. Com base

■

nessas informações, é **CORRETO** afirmar que, ao entrar



no campo magnético, os elétrons desse feixe

"

A) são desviados e sua energia cinética não se altera. Figura I Figura II



B) não são desviados e sua energia cinética aumenta.



Assinale a alternativa em que **MELHOR** se representa a

■

C) são desviados e sua energia cinética aumenta.

imagem que esse televisor passa a produzir nessa situação.

D) não são desviados e sua energia cinética não se altera.

A) C)

**02.** (UFMG) A figura representa um longo fio conduzindo

corrente elétrica  $I$ . Em um dado instante, duas cargas,

uma positiva e outra negativa, estão com velocidade  $B) D) v$ ,

uma de cada lado do fio.

$v$

+

**04.** (Unimontes-MG) Uma partícula com carga positiva  $q$

$I$  e massa  $m$  entra em uma região do espaço em que



– há um campo magnético uniforme de módulo  $B$ ,

■

$v$  perpendicularmente às linhas do campo (veja a figura).

.

A configuração que **MELHOR** representa as forças do fio



sobre cada uma das cargas é  $B$



■

A) C)

■

+ +

.

--



Marque a opção que contém uma afirmativa **CORRETA** a respeito da situação descrita.

■

A) Pouco tempo após penetrar a região, a partícula terá

■

descrito um arco de circunferência de raio  $r = qB/mv$ .



B) D) B) Após penetrar a região, a partícula se moverá em + +



– linha reta, com velocidade constante  $v$ .



–



C) Após penetrar a região, a partícula se moverá em



linha reta, com aceleração  $a = qvB/m$ .



D) Após penetrar a região, a partícula executará um



**03.** (UFMG) O tubo de imagem de um televisor está movimento circular uniforme de período  $T = 2\pi m/qB$ .



representado, esquematicamente, na figura I. Elétrons



são acelerados da parte de trás desse tubo em direção ao **05.** (PUC RS) Cargas elétricas podem ter sua trajetória



centro da tela. Quatro bobinas – K, L, M e N – produzem



alterada quando em movimento no interior de um campo



campos magnéticos variáveis, que modificam a direção

.

magnético. Esse fenômeno fundamental permite explicar

■

dos elétrons, fazendo com que estes atinjam a tela



em diferentes posições, formando uma imagem, como A) o funcionamento da bússola.

.

ilustrado na figura II. As bobinas K e L produzem um B) o aprisionamento de partículas carregadas pelo campo



campo magnético na direção vertical e as bobinas M e N, magnético da Terra.



na horizontal. Em um certo instante, um defeito no C) a construção de um aparelho de raio X.



televisor interrompe a corrente elétrica nas bobinas K e L D) o funcionamento do para-raios.





e apenas as bobinas M e N continuam funcionando. E) o funcionamento da célula fotoelétrica.



## 64 Coleção Estudo



-



-



-



-



-

-



-





# Cargas em movimento em campo magnético

**EXERCÍCIOS PROPOSTOS 03.** (UFV-MG) A direção do campo elétrico  $E$  é definida como

a direção da força elétrica aplicada sobre uma carga positiva. Por que não se pode definir a direção do campo

**01.** (UFPI) O vento solar, um plasma fino de alta velocidade, magnético  $B$  do mesmo modo?

sopra constantemente do Sol a uma velocidade média de  $A$ ) Porque a força magnética sobre uma carga em

$400 \text{ km/h}$ . Se a Terra não tivesse um campo magnético repouso não é nula.

global, ou magnetosfera, o vento solar teria um impacto  $B$ ) Porque a força magnética em uma carga positiva é

direto em nossa atmosfera e a desgastaria gradualmente. sempre nula.

Mas o vento solar bate na magnetosfera da Terra e é

C) Porque a direção da força magnética em uma carga desviado ao redor do planeta...

positiva depende do vetor velocidade,  $v$ , da carga.

Disponível em:

D) Porque o sentido da força magnética sobre uma carga

ult762u212.shl >

positiva é o mesmo para uma carga negativa.

Para que ocorra o desvio anteriormente mencionado,

E) Porque a direção da força magnética em uma carga

é absolutamente necessário que as partículas do vento

positiva depende da massa da carga.

solar tenham

A) carga positiva e alta velocidade.

B) carga negativa e baixa velocidade. **04.** (UFMG) A figura mostra parte da trajetória descrita por um

feixe de elétrons na presença de um campo magnético.

C) carga diferente de zero e velocidade alta.

D) carga diferente de zero e velocidade diferente de zero.

E) carga positiva e baixa velocidade.

**02.** (UFMG–2007) Um fio condutor reto e vertical passa por

um furo em uma mesa, sobre a qual, próximo ao fio,

são colocadas uma esfera carregada, pendurada em

uma linha de material isolante, e uma bússola, como

**FÍSICA**

mostrado nesta figura:

As setas indicam o sentido do movimento dos elétrons.

**Fio** Nas alternativas, o sinal 8 representa um vetor perpendicular ao papel “entrando” nele e o sinal  $\odot$ , um  $\oplus$  vetor também perpendicular, mas “saindo” do papel.

**Bússola** Assinale a alternativa em que estão representados **CORRETAMENTE** a direção e o sentido do campo magnético que atua nesse feixe de elétrons.

A)

B

Inicialmente, não há corrente elétrica no fio, e a agulha da

B)

bússola aponta para ele, como se vê na figura. Em certo instante, uma corrente elétrica constante é estabelecida B no fio. Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que, após se estabelecer a corrente elétrica no fio, A) a agulha da bússola vai apontar para uma outra C) direção, e a esfera permanece na mesma posição.

B

B) a agulha da bússola vai apontar para uma outra

direção, e a esfera vai se aproximar do fio.

C) a agulha da bússola não se desvia, e a esfera D)

permanece na mesma posição.

D) a agulha da bússola não se desvia, e a esfera vai se B

afastar do fio.

Editora Bernoulli 65

## Frente D Módulo 13

**05.** (PUC RS) A respeito da força magnética que pode atuar **08.**

(UNIFAL-MG) Dois íons de cargas opostas e massas

sobre um próton que se encontra nas proximidades de um diferentes movem-se em um plano, descrevendo

longo condutor retilíneo percorrido por corrente elétrica, trajetórias retilíneas e paralelas, com velocidades de

é **CORRETO** afirmar que mesmo módulo e sentido. Ao atravessarem uma região

A) a força magnética é máxima quando o próton se em que há um campo magnético uniforme e orientado

desloca obliquamente em relação ao condutor.

perpendicularmente ao plano, é **CORRETO** afirmar que

B) a intensidade da força magnética decresce com o descreverão trajetórias

quadrado da distância do próton ao condutor.

C) a força magnética é de atração quando o próton se mesmo sentido. desloca paralelamente ao fio e contrário ao sentido A)

circulares de raios diferentes, ambos movendo-se no

(convencional) da corrente. B) circulares de raios iguais, um movendo-se em sentido

D) a força magnética é de atração quando o próton horário e outro, em sentido anti-horário.

se desloca paralelamente ao fio e no sentido C) retilíneas e paralelas ao campo, movendo-se em

(convencional) da corrente. sentidos opostos.

E) a intensidade da força magnética é diretamente D) circulares e de raios diferentes, um movendo-se em

proporcional ao quadrado da intensidade da corrente sentido horário e outro, em sentido anti-horário.

no condutor.

E) circulares de raios iguais, ambos movendo-se no

**06.** mesmo sentido. (UFV-MG) A figura a seguir mostra um elétron e um fio

retilíneo muito longo, ambos dispostos no plano desta

página. No instante considerado, a velocidade  $v$  do elétron **09.** (PUC Minas) Uma partícula eletricamente carregada

é paralela ao fio que transporta uma corrente elétrica  $I$ . penetra, com uma dada velocidade, em uma região de

Considerando somente a interação do elétron com a campo magnético uniforme. Leia as afirmações a seguir:

corrente, é **CORRETO** afirmar que o elétron  $I$ . A trajetória da partícula será circular se sua velocidade

for perpendicular à direção do campo magnético.

II. A trajetória da partícula será sempre circular.

### III. A força magnética que age sobre a partícula não altera

# I

sua velocidade vetorial.

—

IV. A força magnética que age sobre a partícula não modifica sua energia cinética.

- A) não será desviado.
- B) será desviado para a direita desta página. Assinale
- C) será desviado para a esquerda desta página. A) se III e IV são incorretas.
- D) será desviado para fora desta página. B) se I e III são corretas.
- E) será desviado para dentro desta página. C) se I e II são incorretas

**07.** D) se I e IV são corretas. (PUC Minas) Duas partículas carregadas são lançadas

com a mesma velocidade em um ponto P de uma região **10.** (UFMG) Na figura, estão representadas duas placas

na qual existe um campo magnético vertical constante metálicas paralelas, carregadas com cargas de mesmo perpendicular à folha do desenho e saindo da folha. Uma

delas segue uma trajetória I dentro da região, e a outra valor absoluto e de sinais contrários. Entre essas placas,

segue uma trajetória II. Analisando a figura seguinte, existe um campo magnético uniforme B, perpendicular

conclui-se que, necessariamente, ao plano da página e dirigido para dentro desta, como



mostrado, na figura, pelo símbolo 8. Uma partícula com

II I

carga elétrica positiva é colocada no ponto P, situado

P entre as placas.

A) as duas partículas têm a mesma massa e a mesma — — — — —  
— — — — —

carga.

B) as duas partículas têm massas e cargas diferentes.

C) a trajetória I corresponde ao movimento da carga de

P

maior massa.

D) a trajetória II corresponde ao movimento da carga

de menor massa.

E) a partícula II está sujeita a uma maior aceleração. + + + +  
+ + + + + + +

## 66 Coleção Estudo

# Cargas em movimento em campo magnético

Considerando essas informações, assinale a alternativa Placa negativa N Anteparo em que **MELHOR** está representada a trajetória da 1 2 Elétron partícula após ser solta no ponto P. 4 3 Placa positiva A) C) P S

P

A) 1. C) 3.

B) D) P B) 2. D) 4.

P **14.** (UFRN–2009 / Adaptado) Considerada como futura

alternativa para geração de energia elétrica a partir da

**11.** queima de biomassa, a geração magneto-hidrodinâmica (UFMG)  
Um elétron entra com uma velocidade  $v_0$  em uma

região em que existem um campo elétrico utiliza um fluxo de gás  
ionizado (íons positivos e elétrons),  $E$  e um campo

magnético que passa com velocidade,  $v$ , através de um campo  $B$   
uniformes e perpendiculares entre si, como

mostra a figura. A velocidade  $v$  magnético intenso,  $B$ . A ação da  
força magnética desvia é perpendicular aos dois  $o$  essas partículas para  
eletrodos metálicos distintos, gerando, campos. O elétron não sofre  
nenhum desvio ao cruzar a entre eles, uma diferença de potencial  
elétrico capaz região dos campos. As forças elétrica,  $F_e$ , e magnética,  
 $F_m$ , de alimentar um circuito externo. O esquema a seguir que atuam  
sobre o elétron nessa situação, são **MELHOR** mostra um gerador  
magneto-hidrodinâmico no qual estão representadas por identificados  
a direção do fluxo do gás, os polos do ímã  $B$  gerador do campo  
magnético e quatro eletrodos coletores  $E$  dos íons e dos elétrons.  
Nessas condições, pode-se afirmar

que os potenciais ( $V$ ) dos eletrodos são tais que

-

$v_0$  N II

Feixe de íons e elétrons ímã I

B III

A) B) C) F F F coletores e F D) e m F ímã Eletrodos IV

## m FÍSICA

e –

– F<sub>m</sub> A)  $V > V$  . C)  $V > V$  . – – II IV I III

F B)  $V < V$  . D)  $V < V$  . II IV I III

F e m

**15.** (FCMMG) As imagens numa televisão são formadas pelo

**12.** impacto sobre a tela de inúmeros feixes de elétrons que

(CEFET-MG–2007) Um elétron é lançado com velocidade  $v$  provêm da parte posterior do tubo de TV. A imagem é

em uma região onde existem um campo elétrico  $E$  distorcida pela aproximação de um ímã. Considere apenas

e um campo magnético  $B$ , uniformes e mutuamente um feixe de elétrons que se dirige para o centro da tela,

perpendiculares, conforme a figura a seguir. Após penetrar

como mostra a figura.

nessa região, a trajetória do elétron será

$E$

$B$

$v$

Cada uma das figuras a seguir mostra a representação de

uma TV e de um ímã em forma de barra com seus polos

A) circular, se  $E < vB$ . D) parabólica, se  $E > vB$ . norte (N) e sul (S) próximos da TV. Para deslocar o feixe

B) circular, se  $E = vB$ . E) parabólica, se  $E = vB$ . de elétrons para baixo, a posição do ímã, em relação à

C) retilínea, se  $E = vB$ . TV, deve estar representada como na figura

**13.** A) C) (FCMMG) Um feixe de elétrons é lançado horizontalmente s  
N

e passa no interior de um par de placas, carregadas N S

eletricamente, e nas proximidades dos polos norte (N)

e sul (S) de dois ímãs permanentes, até colidir com um

anteparo, como mostra a figura. Ao passar pelas regiões B) D) S N

das placas e ímãs, o feixe de elétrons será desviado para

a região do anteparo designada pelo número N S

Editora Bernoulli 67

## Frente D Módulo 13

**SEÇÃO ENEM** O colapso do campo magnético poderia enfraquecer esse

escudo e deixar penetrar a radiação solar na atmosfera

**01.** terrestre. As tempestades solares golpeariam a atmosfera (Enem–2001) A figura mostra o tubo de imagens dos

aparelhos de televisão usado para produzir as imagens com radiação suficiente para destruir quantidades

sobre a tela. Os elétrons do feixe emitido pelo canhão significativas de ozônio, que protege a Terra dos nocivos

eletrônico são acelerados por uma tensão de milhares de raios ultravioletas. A radiação ultravioleta emitida pelo Sol

volts e passam por um espaço entre bobinas em que são pode destruir formas de vida, arrasar os campos de cultivo,

defletidos por campos magnéticos variáveis, de forma a aumentar as incidências de câncer, principalmente de pele,

fazerem a varredura da tela. e produzir cataratas em humanos e animais. Altos níveis de

Bobinas para radiação ultravioleta se espalhariam dos polos até o Equador.

a deflexão Disponível em:

Canhão vertical campo-magnetico-terrestre-  
curiosidades.html > . (Adaptação). eletrônico

As partículas carregadas emanadas do Sol e que atingem

a magnetosfera são desviadas pelo campo magnético.

Havendo uma redução drástica na intensidade do campo

magnético  
terrestre,

Bobinas para

a deflexão Elétrons Tela A) a força magnética sobre tais partículas aumenta, horizontal o que provoca maior aceleração, fazendo com que

um número maior delas consiga chegar à camada

Nos manuais que acompanham os televisores, é comum

atmosfera

encontrar, entre outras, as seguintes recomendações:

I. Nunca abra o gabinete ou toque as peças no interior B) a velocidade das partículas aumenta e, dessa forma,

do televisor. um maior número delas colide com a superfície

II. Não coloque seu televisor próximo de aparelhos terrestre, uma vez que o campo, mais fraco, não

domésticos com motores elétricos ou ímãs. consegue desacelerar as partículas.

Essas recomendações estão associadas, respectivamente, C) o ângulo entre a velocidade das partículas e o campo

aos aspectos de magnético terrestre aumenta e tende a  $90^\circ$  e, assim,

A) riscos pessoais por alta tensão / perturbação ou numa incidência perpendicular, fica mais fácil de as

partículas penetrarem na magnetosfera.

deformação de imagem por campos externos.

B) proteção dos circuitos contra manipulação indevida / D) a força magnética sobre tais partículas diminui,

perturbação ou deformação de imagem por campos ficando menor o desvio magnético sofrido por

externos. elas e, dessa forma, um número maior de partículas

consegue chegar à superfície da Terra.

C) riscos pessoais por alta tensão / sobrecarga dos

circuitos internos por ações externas. E) a velocidade das partículas diminui e, dessa forma,

mais partículas atingem a superfície, principalmente

D) proteção dos circuitos contra a manipulação indevida /

na região do Equador, um vez que o campo não mais

sobrecarga da rede por fuga de corrente.

consegue desviá-las para os polos Norte e Sul.

E) proteção dos circuitos contra manipulação indevida /

sobrecarga dos circuitos internos por ação externa.

**02.** Durante as explosões solares, diversas partículas são

## GABARITO

ejetadas pelo Sol e se deslocam pelo espaço em todas

as direções. Em escala planetária, o campo magnético

terrestre forma um escudo que protege a Terra dos **Fixação**

ventos solares e de suas partículas mortais. Nos últimos

01. D 02. B 03. B 04. D 05. B

150 anos, a intensidade do campo caiu de 10% a 15%,

queda que vem se acelerando recentemente. A chamada

## Propostos

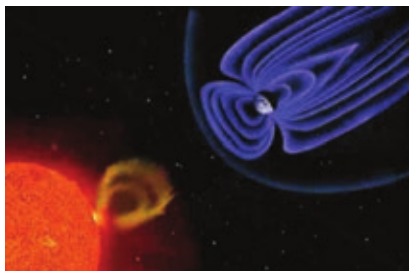
magnetosfera se estende por cerca de 60 mil quilômetros

acima da superfície terrestre na direção voltada 01. D 05. D 09. D  
13. D

para o Sol. A parte oposta é ainda mais longa, formando 02. A 06. C  
10. B 14. C

uma cauda semelhante a de um cometa.

03. C 07. E 11. A 15. B



04. B 08. D 12. C

## e Commons Seção Enem

01.  
A  
02.  
D

Maxx / Creativ

68 Coleção Estudo

## FÍSICA MÓDULO FRENTE

### Força magnética sobre fios 14 D

Imagine a felicidade de uma criança brincando com sentido bem definidos. Na figura a seguir, essa força tenta

seu carrinho elétrico. Sabemos que, dentro dele, existem desviar as cargas para baixo (regra do tapa).



Entretanto,

pilhas ou baterias e que elas podem acender uma lâmpada. como essas cargas estão confinadas ao fio, o efeito resultante

Mas como essas pilhas produzem movimento no carrinho das forças magnéticas atuando sobre cada uma das cargas

desse garoto felizardo? Você já deve ter visto as torres de será uma força magnética resultante ( $F$ ) atuando sobre o

transmissão de eletricidade. Por que os fios, nessas torres, condutor, que o empurra, também, para baixo.

ficam tão longe uns dos outros? Não seria mais econ  mico

L

aproximá-los, para que a estrutura da torre ocupasse menos

espaço e se gastasse menos material na sua constru  o? B

Neste módulo, você descobrir   as respostas para tais Q =  $n.e v I$  - - - - - questionamentos.

$f_i f_i f_i f_i f_i f_i f_i f_i$

Já sabemos que uma carga elétrica, deslocando-se em

uma região onde há um campo magnético, pode sofrer

a  $F = n \cdot f_i$  ação de uma força que desvia sua trajetória. Uma corrente

elétrica é um movimento ordenado de cargas elétricas. Observe que, em um comprimento  $L$  do fio, existem

Assim, nada mais sensato do que esperar que as cargas que  $n$  cargas elementares ( $e$ ) em movimento e, dessa forma,

constituem a corrente elétrica também sofram, em condições a carga total contida naquele trecho é  $Q = n.e$ . A velocidade

particulares, a ação de forças de origem magnética, média de cada carga, ao percorrer o comprimento  $L$ ,

o que, de fato, acontece. será  $v = L/\Delta t$ . Sabemos que a força, em cada uma das

Uma das aplicações mais importantes desse fenômeno cargas, é  $f = B.e.v$ , e que a corrente no fio é  $I = Q/\Delta t$ .

é o funcionamento dos motores elétricos, presentes em Assim, a força resultante que atua no fio, de comprimento

aparelhos que apresentam rotação, tais como ventilador,  $L$ , terá módulo igual a:

geladeira, liquidificador e muitos outros.  $F = n.f = n.B.e.v = B.n.e.L/\Delta t = B(Q/\Delta t)L = B.I.L$



**FORÇA EM CONDUTOR** Na equação anterior,  $B$  é o módulo do campo magnético,

**MERGULHADO EM UM CAMPO**  $I$  é o valor da corrente elétrica, e  $L$  é o comprimento do

**MAGNÉTICO** Sabemos que a força magnética é perpendicular ao vetor condutor mergulhado no campo magnético.

campo magnético e ao vetor velocidade da carga.  
Como a

Vamos considerar uma região na qual exista um campo corrente ( $I$ ) está na direção do movimento das cargas ( $v$ ),

magnético uniforme e, também, um condutor colocado nessa a força sobre o fio será: região, perpendicularmente às linhas de indução. Nesse



condutor, as cargas livres estão se movendo aleatoriamente.  $F \perp B$  e  $F \perp I$  Isso faz com que a força magnética que atua sobre cada uma

dessas cargas aponte em direções também aleatórias. Assim, O sentido da força magnética é dado pela regra do tapa,

a força resultante que atua sobre o conjunto de cargas é colocando-se o dedão no sentido da corrente elétrica (I) e

nula. Quando uma corrente elétrica (I) passa pelo condutor, os quatro dedos no sentido do vetor campo magnético (B).

cada carga em movimento ordenado, dentro do fio, ficará O sentido da força magnética sobre o condutor é indicado

sujeita a uma força magnética individual ( $f$ ), com direção  $e_i$  pela palma da mão direita. Veja a figura seguinte:

Editora Bernoulli 69

## Frente D Módulo 14

y É por isso, e só por isso, que esse campo aplica

B corrente elétrica.  
força sobre as cargas  
ordenadas que  
constituem a

B

x 3. Use a regra do tapa (na figura seguinte) com o

Um campo magnético gerado pela própria corrente

força (B). Se ele aplicasse força sobre o fio, haveria duas

forças. Uma para baixo,  $F$  (exercida pelo campo  $B_C + -$  que está na parte de cima do fio), e outra para cima,

$F$  (exercida pelo campo que está na parte de baixo do condutor). Logo, a resultante dessas forças seria nula.

Lembre-se de que o sentido da corrente elétrica

Dessa forma, somente os campos magnéticos

(convencional) corresponde ao sentido do movimento das

externos devem ser usados para determinar a força cargas positivas. Por isso, o “tapa” que determina o sentido

magnética que atua sobre o fio.

da força magnética foi dado com a palma da mão. Imagine

a figura anterior vista “de cima” (eixo y). O campo aponta  $B_B$  para os seus olhos e a corrente elétrica, para a direita.

Assim, os dedos da mão devem apontar para fora da página  $B_L$  (para o seu rosto) e o dedão, para a direita. Faça você mesmo

e confira na figura a seguir. Veja que a força magnética, nessa situação, aponta para a parte de baixo da folha de papel.

FIC

B I I 4. Considere um condutor de 20 m de comprimento, submetido a uma força magnética de 600 N. Assim,

cada metro desse condutor sofrerá uma força de

F F módulo igual 30 N. É muito comum, principalmente + – em linhas de transmissão e de distribuição de energia,

informar o valor da força que atua em cada unidade de comprimento do fio. Na situação desse exemplo,

## Considerações importantes sobre esse valor seria de 30 N/m.

5. A equação da força magnética foi obtida para um fio

## a força magnética que atua em fios colocado perpendicularmente às linhas de indução

( $\theta = 90^\circ$ ). Se o fio formar um ângulo  $\theta \neq 90^\circ$  com o vetor

1. campo magnético, a componente  $v$  da velocidade  $\times$

A força magnética que atua no condutor da figura das cargas será paralela ao campo e, devido a ela, anterior foi obtida tomando como base a corrente não haverá força magnética sobre o fio. Apenas a convencional (movimento de cargas positivas). Qual componente da velocidade perpendicular ao campo ( $v_y$ ) seria a força magnética que atuaria sobre o fio se fosse, contribuirá para que uma força magnética atue sobre tomada como base a corrente real (movimento de o fio. Veja a seguir: elétrons)? Na figura anterior, a corrente (convencional)

é da esquerda para a direita. Logo, a corrente de elétrons é da direita para a esquerda, conforme a  $v_y$  figura seguinte. A diferença é que o “tapa”, agora, é

dado com as costas da mão. Teríamos, assim, a mesma

força magnética resultante. Veja a figura a seguir: B

+  $\theta$

$$I_q v B_x R B$$

$$I_R$$

$$F F \theta$$

$$+ - I$$

2. Essa componente é  $v = v \cdot \sin \theta$ . Dessa forma, Sabemos que um corpo condutor impede que um  $y$  a equação anterior deverá ser escrita como: campo elétrico externo atue em seu interior. Porém,

isso não acontece com o campo magnético, ou seja,  $F = n \cdot B \cdot e \cdot v \cdot \sin \theta = B \cdot n \cdot e \cdot \sin \theta \cdot L / \Delta t$  não existe blindagem magnética. Assim, o campo  $\Rightarrow F = B \cdot (Q / \Delta t) \cdot L \cdot \sin \theta$  magnético da figura anterior, o qual chamaremos



de campo externo (B), atua  $F = B \cdot I \cdot L \cdot \sin \theta$  **dentro** do condutor.

## 70 Coleção Estudo

### Força magnética sobre fios

## EXERCÍCIO RESOLVIDO FORÇA MAGNÉTICA ENTRE

**01. CONDUTORES PERCORRIDOS** Na  
figura a seguir, a corrente elétrica vale  $I = 2,0 \text{ A}$ ,

o módulo do campo magnético entre os polos do ímã é **POR**  
**CORRENTES ELÉTRICAS**



$B = 1,0 \times 10^{-2} \text{ T}$ , o comprimento do fio PQ e a largura do ímã valem  $L = 20 \text{ cm}$ . Determinar o sentido e o módulo da força magnética sobre o fio PQ. Sabemos que uma corrente elétrica gera um campo magnético no espaço à sua volta. Vimos, anteriormente, que um fio percorrido por corrente elétrica e mergulhado numa região onde existem linhas de indução sofre ação de uma força exercida pelo campo magnético. Nada mais lógico P do que esperar que dois ou mais fios, nos quais circulam S N correntes elétricas, devam exercer forças entre si. E é o que, Q de fato, acontece. Vamos analisar dois casos:

## Condutores paralelos

Considere dois fios de comprimento  $L$ , longos e finos,

**Resolução:** paralelos um ao outro, separados pela distância  $d$  e

O sentido da força magnética, no fio, é dado pela regra percorridos por correntes elétricas  $I$  e  $I$ . Cada

uma das <sup>1 2</sup>

do tapa com a palma da mão. A figura a seguir mostra correntes gera, em torno do fio percorrido por ela, um campo

a visão frontal do sistema (olhando de Q para P). magnético, que vamos chamar de  $B_1$  e  $B_2$ , respectivamente. <sup>1 2</sup>

A corrente sai pelo ponto Q, e o campo do ímã aponta Observe que cada fio se encontra imerso no campo

para a esquerda. O sentido da força magnética atuante magnético criado pela corrente do outro fio.

no fio PQ é para baixo, conforme  
mostrado. FÍSICA O que acontece  
entre eles quando as correntes têm  
O

B mesmo sentido? A figura seguinte mostra o campo  
magnético  
gerado por cada corrente na região onde se encontra o  
I outro fio. Os sentidos dos campos magnéticos  $B_1$  e  $B_2$   
foram <sup>1 2</sup>

determinados usando a regra da mão direita. Utilize  
essa

F

regra, você também, para comprovar o resultado.

B I

S N I<sub>2</sub>

Q

F

B<sub>2</sub> B<sub>2</sub>

I<sub>1</sub> I<sub>2</sub>

I<sub>1</sub> L

Observe que a corrente é perpendicular ao campo. Assim,

o valor dessa força é igual a: B B

1 1

$$F = B.I.L = 1,0 \times 10^{-2} \cdot 2,0 \cdot 0,20 = 4,0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

**Atenção:** d

Veja que, na resolução, optamos por trabalhar com a visualização da figura em duas dimensões. Na maioria conhecidos os campos B e B e os sentidos das correntes<sub>1 2</sub>

das vezes, essa técnica facilita a resolução do

exercício, I e I , vamos determinar a força magnética entre os fios <sub>1 2</sub> pois muitas pessoas têm dificuldade de visualizar figuras (regra do tapa). Note que as forças entre fios percorridos por

em três dimensões. Seria interessante você se acostumar correntes de mesmo sentido são de atração. Utilize a regra

com esse tipo de visualização. do tapa e confira esse fato na figura seguinte:

Editora Bernoulli 71

## Frente D Módulo 14

I I Observe que as duas equações anteriores são, exatamente, <sub>1 2</sub>

$B_2$  as mesmas. Dessa forma, as duas forças (de atração

ou de repulsão) entre os fios têm, de fato, o mesmo

F I I <sub>1 21</sub> F Quando precisar usá-las, você poderá fazer a dedução, F módulo. Não há necessidade de se decorar tais equações.

<sub>21</sub>  $F_{2 12 12}$

$B_1$  conforme realizado anteriormente. Basta saber que as forças

magnéticas entre condutores são proporcionais ao  
produto

das correntes e inversamente proporcionais à distância  
entre

$B_2 B_1$  os fios, ou seja:

Você se lembra de que começamos o módulo  
dizendo que os  $d \propto I_1 I_2$  .  $F_2 \propto d$

de energia, encontram-se distantes uns dos outros?

Isso é **Condutores perpendiculares** fios,  
principalmente nas torres de transmissão e de  
distribuição necessário, entre outras coisas, porque  
eles podem ser Considere dois fios de comprimento  $L$ ,  
longos e finos,

percorridos por correntes de mesmo sentido. Assim,  
haverá perpendiculares um ao outro, isolados  
eletricamente e

atração entre eles, o que pode levar a um eventual  
contato percorridos por correntes elétricas  $I$  e  $I$  .  
Sabemos que  $a_{12}$  e, por consequência, a um curto-  
circuito na rede elétrica. corrente, em cada fio, cria  
um campo magnético na região

Ninguém gosta quando isso acontece, não é verdade?  
onde está o outro e que os fios exercem forças entre si.

No caso anterior, tais forças produziram atração ou  
repulsão

Se as correntes elétricas que percorrem os fios paralelos entre os fios. Veja, agora, o que vai acontecer.

tiverem sentidos opostos, a força entre esses fios será de repulsão. Deixamos, como exercício para você, magnéticos (obtidos pela regra da mão direita) e as forças Na figura a seguir, já estão desenhados os campos

a demonstração de tal fato. magnéticas (desenhadas conforme a regra do tapa).

Utilize as regras da mão direita e do tapa para conferir as

**Resumindo:** direções e os sentidos dos campos e das forças.

Fios percorridos por correntes de  $B_2$   $F_{21}$

$F_{12}$



– mesmo sentido se atraem.  $I_1$   $B_1$



– sentidos opostos se repelem.  $I_2 B_1$

As forças magnéticas determinadas na figura anterior  $F_{12}$

valores das correntes, uma vez que formam um par de  $B$  sempre terão o mesmo módulo, independentemente dos  $F_{212}$

ação e reação. Observe que as forças  $F$  tendem a girar o fio vertical no  $21$

O valor de cada campo pode ser determinado por: sentido horário, e as forças  $F$  tendem a girar o fio horizontal  $12$

no sentido anti-horário, provocando um alinhamento entre

I eles. As forças magnéticas atuam de forma a dispor os

$B = \mu \cdot I_1 I_0$  fios, paralelamente, entre si e a fazer com que eles sejam  $2 \pi d$  percorridos por correntes de mesmo sentido. Se os fios

$B I_2 = \mu$  puderem girar livremente, é o que vai acontecer com eles.

$2 \cdot 0 \ 2\pi d$

## EXERCÍCIO RESOLVIDO

A força sobre cada fio pode ser calculada por: **02.**

Considere um solenoide formado por fios flexíveis e finos,

$$F \text{ de modo que se possa alterar, com facilidade, as suas} \\ = B \cdot I \cdot L \text{ e } F = B \cdot I \cdot L$$

21 2 1 1 2 1 2 dimensões. Ele é apoiado sobre uma mesa sem atrito e

existe ar dentro dele. Ao ser ligado a uma bateria, uma

Substituindo os valores dos campos, temos: corrente  
percorre os anéis do solenoide. Discutir as

alterações que vão ocorrer nas dimensões do solenoide

$$F \text{ I devido à passagem da corrente elétrica. } \mu I I . = \\ \mu . 2 I L . 0 . 1 2 L_{21 0 1} = 2 \pi d \quad 2 \pi d$$

$$F I I I_1 = \mu . \mu . I L . 0 . 1 2 L_{12 0} 2 d_2 = \pi 2 \pi d$$

## 72 Coleção Estudo

### Força magnética sobre fios

**Resolução:** Devido às forças  $F$  e  $F$ , a espira sofre um torque  $AB \ CD$

Observe, a seguir, que cada anel é percorrido, tanto na (binário de forças) no sentido horário e começa a girar

parte superior (onde estão indicadas as setas) quanto em torno do eixo nesse sentido. Esse é o princípio básico



na parte inferior (que está em contato com a mesa), de funcionamento dos motores elétricos e dos medidores por correntes de mesmo sentido. Dessa forma, haverá (galvanômetro) de quadro móvel, descritos a seguir.

uma atração entre os anéis e, assim, o comprimento do

solenóide ficará menor, ou seja, os anéis irão se aproximar.

## Motor de corrente contínua

F F Assim que a espira da figura anterior completar meia volta,

os fios AB e CD trocarão de posições. A partir desse ponto,

desde que a corrente, em cada fio, continue no mesmo sentido, o torque se inverterá, passando a ser no sentido

anti-horário e retardando a rotação da espira.

### I

Para evitar isso, a cada meia volta da espira, a polaridade

da fonte de tensão deve ser invertida. Nos motores

Agora, veja o que acontece com o raio de cada anel. alimentados por corrente alternada, essa inversão de

A figura a seguir mostra um dos anéis visto de frente. polaridade da fonte se faz de forma natural. Nesse caso,

Note que a corrente, em pontos simétricos do anel, possui para se obter torque sempre de mesmo sentido, basta haver

sentidos contrários. uma sincronização entre as frequências de rotação do motor

e de alternância da corrente.

F Nos motores de corrente contínua, para se obter torque F

sempre favorável ao movimento, existem duas peças

I muito importantes: as escovas (J e K) e o comutador (AB). I

O comutador é um pequeno cilindro cortado ao longo de seu

comprimento e preenchido por um isolante. A figura seguinte

I I mostra um modelo simplificado de um motor alimentado

por uma fonte de corrente contínua, com destaque para as

F escovas e para o comutador. Veja que a corrente elétrica F **FÍSICA**

sempre entra pela escova J e sai pela escova K. A espira

Assim, haverá uma repulsão entre todas as partes do PQNM tem suas extremidades soldadas às partes condutoras

anel, o que provoca um aumento no seu raio. Portanto, do comutador (AB), que gira junto com o motor.

o solenoide ficará mais curto e mais largo.

S

## O TORQUE MAGNÉTICO E SUAS APLICAÇÕES

A figura a seguir mostra uma espira retangular ligada a uma

fonte de tensão. A espira é colocada em repouso no interior de um campo magnético que aponta para a direita. Fechando-se

a chave Ch, o circuito é percorrido por uma corrente elétrica,

de forma que ela atravessa o fio CD de D para C e o fio AB. Quando a fonte é ligada, a corrente entra no motor pelo

de B para A. Aplicando a regra do tapa, verificamos que o fio MN (através da parte A do comutador) e sai pelo fio QP.

AB sofre uma força  $F$  voltada para cima, enquanto o fio CD. Use a regra do tapa (o campo magnético aponta do norte para o sul).

sofre uma força  $F$  voltada para baixo. Os outros fios, BC e para o sul) e veja que o fio MN sofre ação de

uma força<sub>CD</sub>

AD, acham-se paralelos às linhas do campo e, por isso, não magnética para cima, e que o fio QP sofre ação de uma

sofrem ações de forças magnéticas. força para baixo.  
Após meia volta da espira, os fios terão

trocado de lugar. Assim, a corrente entra no motor  
pelo

Eixo F<sub>AB</sub> S fio PQ (através do lado B do  
comutador) e sai pelo fio I C NM, o que  
mantém o torque no mesmo sentido anterior.

B D Dessa forma, a rotação do motor é mantida  
sempre no  
sentido  
horário.

N A I Eixo F<sub>CD</sub> Quando se quer inverter o sentido de  
rotação do motor,

Ch basta trocar a polaridade da bateria. Dessa forma,  
o carrinho

– + elétrico do nosso felizardo garotinho pode andar  
para frente

ou para  
trás.

# Frente D Módulo 14

Naturalmente, para se obter torques mais elevados,



os motores elétricos são dotados de uma grande quantidade de espiras enroladas em torno do rotor – parte mecânica – que dá sustentação aos fios – em forma de bobinas. Isso



faz com que cada fio sofra ação de uma força magnética,



o que produz um torque resultante elevado no motor.

Veja, a seguir, um corte lateral em um motor com

algumas

espiras enroladas em torno do rotor. Considere que o campo



magnético esteja orientado conforme mostrado na figura.

..

A corrente entra no motor pelos fios à esquerda e sai pelos

■

fios à direita. Os fios superior e inferior não contribuem para

.

o torque (as forças apontam na direção do eixo de rotação. Se o sentido da corrente for invertido, o torque magnético



do motor) e, por isso, as correntes não foram desenhadas. Será oposto ao mostrado anteriormente. Assim, o ponteiro



gira para a esquerda. Esse tipo de galvanômetro, além de



F Eixo de medir o valor da corrente, determina o sentido

desta no

rotação circuito.

F

## B I I F F LEITURA COMPLEMENTAR

### A corrente elétrica nos sólidos

F

Fizemos, em estudos anteriores, a convenção de que a corrente

elétrica, num condutor qualquer, era formada pelo movimento

F de cargas positivas – corrente convencional. Hoje, sabemos que,

nos condutores sólidos, ela é formada pelo deslocamento de



Nessa figura, foram indicadas apenas algumas forças elétrons. Quem descobriu isso, em 1879, foi o cientista E. H. Hall,



para não poluí-la. Nos motores comerciais, o campo no mesmo ano da experiência com raios catódicos (elétrons)



magnético é radial ao eixo do motor (o ímã tem forma curva feita por J. J. Thomson. acompanhando o rotor). Assim, cada espira fica submetida



a forças perpendiculares aos fios, o que aumenta o torque. Vimos que o sentido da força magnética que atua em um



condutor, percorrido por corrente elétrica, independe de quem



sejam os portadores de carga, ou seja, a força magnética



## Galvanômetro de quadro móvel

externa que atua sobre o condutor é a mesma, seja a corrente formada por cargas elétricas positivas ou negativas.





Vários galvanômetros analógicos (de ponteiros) têm o

funcionamento baseado no torque magnético. Nesse caso, Vamos agora descobrir, juntos, quem, na verdade,

o binário de forças nas espiras é usado para girar o ponteiro se movimenta dentro de um condutor sólido (prótons ou

desses aparelhos – que ficam presos ao rotor. As figuras a elétrons). Considere, a seguir, uma placa metálica ABCD ligada

seguir mostram um galvanômetro em corte, em que são vistos a uma bateria. Observe que o lado AB está num potencial

três espiras (que formam a bobina), o ponteiro, o ímã e uma elétrico maior (polo positivo da pilha) e o lado CD, num menor

mola espiral. Na figura (a), não há corrente passando pelo potencial (polo negativo da pilha). Assim, um campo elétrico

aparelho, o ponteiro está no meio da escala – trata-se de um surge, dentro da placa, no sentido  $AB \rightarrow CD$ . As cargas elétricas

galvanômetro de zero central –, e a mola não está deformada. da placa se movimentam devido a esse campo, ou seja,



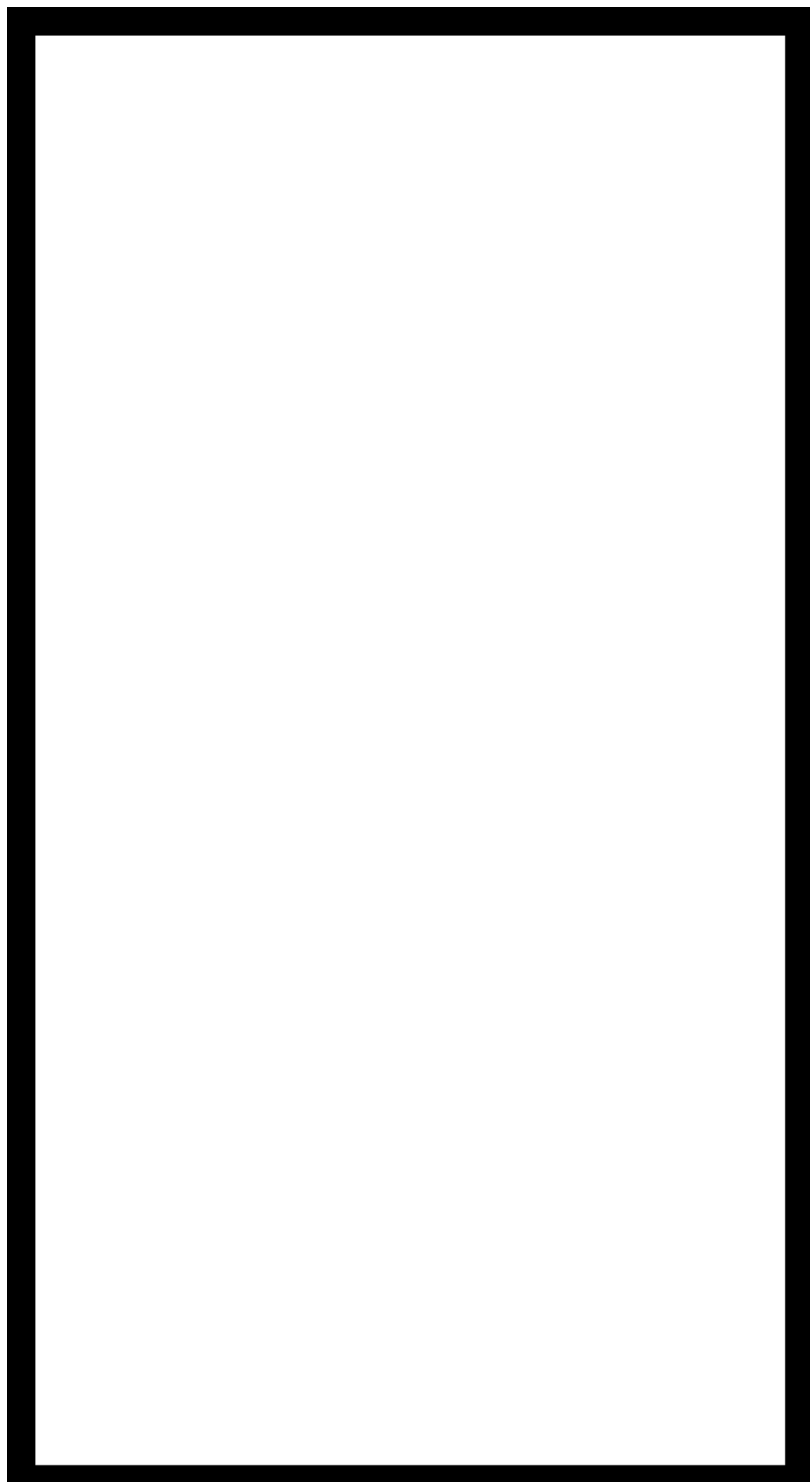
uma corrente elétrica flui através dela, conforme indicado a



seguir. Na primeira figura, temos uma corrente convencional



F (movimento de cargas “positivas”) e, na segunda, uma



corrente real ou eletrônica (movimento de elétrons). As setas

brancas indicam o sentido do movimento das cargas (positivas,

I na primeira figura, e negativas, na segunda).

**S N S N**

**I**

**C -- D C -- D**

**- F**

**+ + --**

**(a) (b)**

**-- + +**

da esquerda. O torque aplicado pela força magnética gira o Na figura (b), uma corrente entra no aparelho pelos fios -- E V E V + + + + -- ponteiro no sentido horário. Agora, a mola está deformada I I

e exerce um torque em sentido oposto. No momento em -- + + que os torques se equilibram, o ponteiro se estabiliza e a

leitura pode ser feita na escala do instrumento, conforme B A B A + + + + a figura a seguir:

**74** Coleção Estudo

**Força magnética sobre fios**

A) Na situação II, flui corrente no sentido BA, e o campo

O que acontece com as cargas da figura anterior se um campo está saindo da folha.

magnético for aplicado perpendicularmente à placa? Lembre-se

de que o campo magnético não atua em cargas em repouso. B) Na situação II, flui corrente no sentido BA, e o campo

Assim, apenas os prótons, na primeira figura, ou os elétrons, está entrando na folha.

na segunda, sofreriam a ação de uma força exercida pelo campo C) Na situação III, flui corrente no sentido AB, e o campo

magnético. Sabemos que a força magnética desvia as cargas está entrando na folha.

lateralmente. Considere as linhas de indução entrando na folha D) Na situação III, flui corrente no sentido BA, e o campo

de papel (para não poluir a figura, mostramos apenas uma linha está saindo da folha.

do campo magnético). Veja, nas figuras a seguir, o resultado desse deslocamento lateral.

F + são percorridos por correntes elétricas constantes e de - F - + x x sentidos opostos. Inicialmente, as correntes nos fios são B + - B F F - + iguais, como mostrado na figura I. Em seguida, André - - V V + + dobra o valor da corrente no fio L, como representado F + - F - + I E C C - - D - - D circuito em que dois fios - K e L - retilíneos e paralelos E **02**. (UFMG-2006) Em um experimento, André monta um

I na figura II.

F + - - + F i i K K B A B + + + + A

A direção e o sentido da força magnética que atua em cada L L uma das cargas em movimento foram obtidos com a regra do i 2i tapa (com a palma da mão para as cargas positivas e com as

I II

costas da mão para as cargas negativas).

Primeiro, observe que a força magnética resultante que atua Sejam  $F_K$  e  $F_L$ , respectivamente, os módulos das forças

na placa aponta para a esquerda (independentemente de quais magnéticas nos fios K e L. Considerando-se essas

cargas estejam em movimento). informações, é **CORRETO** afirmar que,

Depois, veja que, na primeira figura, o lado BC apresenta A) na figura I,  $F_K = F_L = 0$  e, na figura II,  $F_K \neq F_L$ .

excesso de cargas positivas e, na segunda, é o lado AD que B) na

figura I,  $F = F \neq 0$  e, na figura II,  $F \neq F$ . **FÍSICA**

apresenta excesso de cargas positivas. Isso acontece porque as C) na figura I,  $F_K = F_L = 0$  e, na figura II,  $F_K = F_L \neq 0$ .

cargas em movimento sofrem a ação de forças magnéticas que D) na figura I,  $F_K = F_L \neq 0$  e, na figura II,  $F_K = F_L \neq 0$ .

as desviam lateralmente. Dessa forma, existe uma diferença de potencial entre as laterais da placa. Hall mediu a diferença de

potencial entre as laterais e concluiu que os

portadores de carga **03.** Um fio longo, percorrido por uma corrente convencional (I),

da corrente elétrica nos sólidos são, na verdade, elétrons. Dessa está colocado num plano perpendicular à folha, saindo

forma, a segunda figura apresenta o que ocorre na realidade.

dela. Dois campos, um elétrico (sentido oeste-leste) e

Perceba, por último, que só é importante você usar a corrente  
outro magnético (sentido sul-norte), atuam na região

eletrônica se for necessário descobrir qual lateral ficará positiva  
onde se encontra o fio. Os campos são uniformes,

e qual estará negativa ou se o exercício pedir a força magnética  
perpendiculares, e suas direções estão no plano da folha.

sobre os elétrons. Para os outros casos, continue a usar a O fio pode  
se deslocar para qualquer direção. A respeito

corrente convencional.

das forças que os campos exercem sobre o fio, dois

estudantes assim se expressaram:

## EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO<sub>B</sub>

### 01. N E

(PUC) A figura a seguir representa um fio condutor flexível I  
estendido entre as extremidades A e B, na vertical,

O L

e uma região circular em que existe um campo magnético  
uniforme e constante, perpendicular ao plano da folha.

S

Na situação I, não flui corrente pelo fio. Assinale a  
afirmativa **CORRETA**.

Lalá: A resultante entre elas, na situação mostrada,

B B B aponta na direção nordeste, pois a corrente é a

convenci

Lulu: O fio tende a se deslocar para a esquerda, pois o campo magnético é maior do que o campo elétrico. Fez (fizeram) afirmações **CORRETAS** e pertinentes

A) Lalá, apenas. C) os dois.

A A A

I B) Lulu, apenas. D) nenhum dos dois. II III

Editora Bernoulli 75

## Frente D Módulo 14

**04.** (UFSM-RS) A figura representa uma espira ligada a uma

## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

bateria por meio de uma chave S e imersa numa região

de campo magnético. Ao se ligar a chave S, a espira

**01.** (UECE) Um condutor metálico, mesmo transportando uma

tende a corrente, tem carga líquida zero. Quando colocado numa

região com um campo magnético perpendicular a esta

folha de papel, como mostra a figura, ele sofre uma força

S

Z Chave S magnética lateral. Isso ocorre porque a força magnética

X x x x x x B

Y x x F x x x



N

Bateria — e — —

A) girar ao redor do eixo X, no sentido  $Y \rightarrow Z$ . X X X X X

B) girar ao redor do eixo X, no sentido  $Z \rightarrow Y$ .

X X X X X

C) se deslocar, sem girar, na direção do eixo Z.

D) escapar da região de campo ao longo do eixo X. A) é mais forte nos prótons por terem maior massa que

E) escapar da região de campo ao longo do eixo Y. os elétrons.

B) acontece somente em cargas que se movem.

**05.** (UFMG) Uma bateria, ligada a uma placa metálica, cria C) nos prótons é neutralizada pelas forças elétricas.

nesta um campo elétrico E, como mostrado na figura I. D) nos elétrons é paralela à direção e ao sentido de B.

Esse campo causa movimento de elétrons na placa.

Se essa placa for colocada em uma região em que existe **02.** (MEDSantos-SP) O condutor AB contido no plano da

um determinado campo magnético B, observa-se que figura, de comprimento  $L = 10 \text{ cm}$ , é percorrido por

elétrons se concentram em um dos lados dela, como uma corrente de 5 A, numa região de indução magnética

mostrado na figura II. uniforme de intensidade 0,01 T. Podemos concluir que

----- A

I e II

B

Bateria Bateria

Com base nessas informações, assinale a alternativa em A) não há força magnética sobre o condutor.

que **MELHOR** estão representados a direção e o sentido B) a força magnética não pode ser calculada, pois não

do campo magnético existente nessa região. se conhece o ângulo entre o condutor e a indução

magné

A) B C) a força magnética tem intensidade  $5 \times 10^{-3}$  N.

D) a força magnética tem intensidade  $5 \times 10^{-4}$  N.

E) a força magnética tem intensidade 5 N.

(PUC  
Minas)

B) B **Instrução:** Leia o texto a seguir para responder às questões

**03** e  
**04.**

Um condutor retilíneo está preso a duas molas verticais idênticas, cujas extremidades estão ligadas aos polos de uma bateria, conforme indicado. Na situação I,

C) B

cada mola apresenta uma deformação de 2,0 cm em relação ao seu comprimento natural. Na situação II, o condutor foi colocado dentro de uma região na qual existe um campo magnético horizontal, constante e uniforme  $B_A$ , e, nessa situação, a deformação de cada mola passou

D)  $B_A$  ser de 4,0 cm. Na situação III, o campo magnético

horizontal, uniforme e constante atuante no condutor é  $B_B$ , e a deformação foi medida em 6,0 cm. A fonte é a mesma nas

três situações.

## 76 Coleção Estudo

# Força magnética sobre fios



I II III

$M \ N \ B \ M \ N \ A$

$B_B$

Guilherme e Douglas emitem as seguintes opiniões a respeito da demonstração:

**03.** A força que cada mola exerce sobre o condutor, na

Guilherme: A corrente elétrica percorre a barra de

situação III, é

M  
para  
N.

A) igual ao peso do condutor.

Douglas: A força magnética que atua na barra é igual

B) o dobro do peso do condutor.

ao  
seu  
peso.

C) três vezes o peso do condutor.

A respeito das afirmações dos colegas, pode-se concluir

D) 1,5 vez o peso do condutor.

que

**04.** O valor do campo  $B_B$  dividido pelo valor do campo  $B_A$  é B) apenas Douglas está correto. A) apenas Guilherme está correto.

igual a

A) um. C) os dois colegas estão corretos. C) três meios.

B) dois. D) nenhum deles está correto. D) dois terços.

**07.** (ITA-SP-2006) Uma espira retangular é colocada em um

**05.** Um condutor MN, de comprimento total igual a  $6L$ , campo magnético com o plano da espira perpendicular

percorrido por uma corrente elétrica  $I$ , foi dobrado à direção do campo, conforme mostra a figura. Se a

conforme a figura a seguir. Ele foi colocado em uma região corrente

elétrica flui no sentido mostrado, pode-se

na qual existe um campo magnético externo, uniforme afirmar, em relação à resultante das forças e ao torque

e de módulo igual a  $B$ , perpendicular ao plano da folha total em relação ao centro da espira, que

de papel. O módulo da resultante das forças que atuam

## FÍSICA

no condutor MN, devido ao campo magnético externo,  $i$

$B$

é igual a

$L$

$L$

$B$

A) a resultante das forças não é zero, mas o torque total

é  
zero.

B) a resultante das forças e o torque total são nulos.

$I$

C) o torque total não é zero, mas a resultante das forças

é  
zero.

M N D) a resultante das forças e o torque total não são nulos.

E) o enunciado não permite estabelecer correlações entre

A) zero.

as grandezas consideradas.

B) 2B.I.L.

C) 4B.I.L. **08.** (PUC Minas) Há uma força de atração entre dois fios

D) 6B.I.L. longos retilíneos e paralelos, quando, em cada um deles, circula uma corrente elétrica com o mesmo sentido,

**06.** porque há uma interação entre Marcela e Bárbara montaram, para seus colegas,

a demonstração a seguir. Uma barra cilíndrica condutora A) o campo elétrico dentro de um condutor e o campo

horizontal MN está pendurada em um suporte por meio elétrico dentro do outro condutor.

de dois fios condutores, de massas desprezíveis, ligados B) o campo magnético criado pela corrente que passa

às suas extremidades. Os dois fios são ligados aos polos em um condutor e a corrente que circula no outro.

de uma bateria. Nessas circunstâncias, a barra fica em C) a diferença de potencial aplicada a um condutor e o

equilíbrio quando os fios de sustentação estão na vertical. campo elétrico dentro do outro condutor.

Aplicando-se um campo magnético vertical, de baixo para D) o campo elétrico dentro de um condutor e a corrente

cima, os fios de sustentação ficam inclinados  $45^\circ$  em do outro condutor.

relação à vertical, aproximando-se dos olhos do leitor. E) os condutores, devido ao efeito joule.

## Frente D Módulo 14

**09.** (UFRGS) Selecione a alternativa que preenche **12.** (UFRN / Adaptado) Alguns instrumentos analógicos de

**CORRETAMENTE** as lacunas do texto a seguir, na ordem medidas elétricas, como o ilustrado na figura seguinte,

em que elas aparecem. A figura seguinte representa dois são constituídos basicamente pelos seguintes elementos:

fios metálicos paralelos, A e B, próximos um do outro, I) Um ímã fixo.

que são percorridos por correntes elétricas de mesmo

II) Uma bobina de fio condutor enrolado num núcleo de sentido e de intensidades iguais a  $i$  e  $2i$ , respectivamente.

ferro. Essa bobina fica imersa no campo magnético

A força que o fio A exerce sobre o fio B é \_\_\_\_\_,

produzido pelo ímã fixo.

e sua intensidade é \_\_\_\_\_ intensidade da força

exercida pelo fio B sobre o fio A. III) Um ponteiro fixado na bobina de tal forma a

acompanhar qualquer movimento de rotação da

A i bobina, permitindo, assim, o registro dos valores medidos pelo equipamento numa escala devidamente

B  $2i$  calibrada.

A) repulsiva – duas vezes maior do que a IV) Uma mola espiral capaz de produzir um torque

restaurador na bobina, garantindo, portanto,

B) repulsiva – igual à

o processo de leitura da medida elétrica considerada.

C) atrativa – duas vezes menor do que a

D) atrativa – duas vezes maior do que a

E) atrativa – igual à Escala

**10.** Ímã fixo Três condutores longos e retilíneos, M, N e P, são percorridos

por correntes elétricas e colocados paralelamente um ao Bobina

outro. Assinale a alternativa que indica os sentidos das

correntes elétricas nos fios de modo que a força magnética Mola

resultante sobre cada fio seja nula. de ferro Núcleo

**N S**

A) Eixo M N P Campo magnético radial

Quando os terminais desse instrumento são ligados a um

circuito elétrico, uma determinada corrente elétrica circulará

na bobina. A presença da corrente na bobina faz aparecer

B) um torque,  $M M N P_i$ , que faz o ponteiro girar, e um outro torque originário da mola,  $M$ , que tenta restaurar a posição inicial  $m$

do ponteiro. Assim, quando, numa medição, o ponteiro desse

equipamento para, em um determinado valor da escala,

é porque o campo magnético do ímã fixo exerce força sobre



C)

M N P A) o campo elétrico da bobina e  $M_i = M_m$ .

B) o campo magnético da bobina e  $M_i > M_m$ . C) as cargas elétricas em movimento na bobina e

M  
>  
M  
.  
i  
m

D) D) as cargas elétricas em movimento na bobina e  $M = M \cdot i_m$

M N P

**13.** (Mackenzie-SP) A lâmina metálica indicada na figura é percorrida longitudinalmente pela corrente convencional  $i$

**11.** (FUVEST-SP) Um circuito é formado por dois fios muito e está imersa no campo magnético originado pelo ímã.

longos, retilíneos e paralelos, ligados a um gerador de Sendo  $V_x$  e  $V_y$  os potenciais elétricos nos pontos x e y,

corrente contínua como mostra a figura. O circuito é respectivamente, podemos dizer que

percorrido por uma corrente constante  $I$ . Pode-se afirmar

que a força de origem magnética que um trecho retilíneo

exerce sobre o outro é

N

x y

A) nula. S

B) atrativa e proporcional a I.

C) atrativa e proporcional a  $I_2$ .

D) repulsiva e proporcional a I. A)  $V = V$  . C)  $V < V$  . E)  $V = V / 2$ .  
x y x y x y

E) repulsiva e proporcional a I B)  $V > V$  . D)  $V = 2V$  . 2 . x y x y

## 78 Coleção Estudo

### Força magnética sobre fios

**14.** Considere dois fios condutores, rígidos, perpendiculares, **16.**  
(FEI-SP) Uma espira retangular ABCD, de dimensões

e ligados pelos seus centros (C) a uma haste isolante.  $AB = 2 \text{ cm}$  e  $BC = 1 \text{ cm}$ , localiza-se entre os polos N e S

Não existe contato elétrico entre eles. O fio AB é fixado de um ímã permanente conforme a figura. O campo de

sobre uma mesa e o outro pode girar livremente. Eles são indução pode ser considerado uniforme nessa região,

conectados a uma bateria por cabos condutores flexíveis com intensidade  $B = 0,8 \text{ T}$ . A bobina pode girar em torno

e extensíveis. do eixo de simetria e é percorrida pela corrente  $I = 5 \text{ A}$ .

e

I II D A S

A I B B

A S N C B

S A) **CALCULE** o momento (torque) de rotação da espira, na posição indicada.

S

B) **INDIQUE** o sentido em que a espira irá girar e qual III a posição de equilíbrio. **JUSTIFIQUE** sua resposta.

A

B A B **SEÇÃO ENEM**

**IV**

**S 01. Princípios básicos sobre as Railguns**  
(Canhões “elétricos”)

Ligando-se a chave S, os fios rígidos tendem a se colocar

Basicamente, uma railgun é um grande circuito elétrico

paralelos um ao outro nas montagens

composto de três partes: uma fonte de energia, um par

A) I e II, apenas. D) II e III, apenas. de trilhos (rails, em inglês) condutores e paralelos e uma

B) I e III, apenas. E) I, II, III e IV. armação móvel. Esta deve ser condutora e deve ficar em **FÍSICA**

C) II e IV, apenas. contato elétrico com as partes internas de cada trilho.

Nessa armação, fica preso o projétil a ser disparado.

**15.** Quando a fonte de energia é ativada, a armação é (UFMG / Adaptado) Duas barras de cobre foram colocadas

em um recipiente isolante que contém mercúrio e ligadas impulsionada, com velocidade crescente, para fora do

a um circuito contendo uma bateria (V), fios de ligação canhão (sentido oposto ao da fonte de alimentação).

rígidos de resistência desprezível e uma chave (S), Railguns - partes principais

conforme figuras 1 e 2. Ligando-se a chave S, as barras Fonte de

de cobre tendem a ficar conforme está mostrado na alimentação Gerador pulsada de força alternativa:

V S V

Projétil

S Armação

1 2



Hg Hg

Trilhos

A) condutores C)

1 2 1 2

Disponível em:

htm>. Acesso em: 16 de mar. 2011 (Adaptação).

A figura a seguir apresenta o esquema básico da railgun.

Nele, a haste MN, condutora, está em contato com os

B) D) trilhos horizontais. Quando a fonte de alimentação é ligada

1 2 1 2 aos pontos A e B, a haste é disparada levando o projétil

consigo. Isso acontece porque a corrente elétrica que

circula pelos trilhos (AM e BN) cria um campo magnético

que interage com a corrente que circula na haste.

Editora Bernoulli 79



Frente D Módulo 14

M O fio esmaltado deve ser enrolado na forma de uma

A Projétil bobina e as suas extremidades devem ficar em contato

com o arame que estará ligado aos polos da bateria. Para

B

que o motor possa funcionar, as extremidades do fio da



N bobina devem ser raspadas de modo a retirar o esmalte.

Entretanto, para que o motor funcione de forma efetiva

Para que o projétil seja disparado para a direita, na figura e possa girar em alta rotação, uma das extremidades

anterior, a fonte de alimentação ligada aos pontos A e B do fio deve ser raspada apenas de um dos lados,

mantendo o esmalte no outro. Para colocar o motor em

A) deve ser, necessariamente, contínua e o campo

magnético criado pela corrente que circula nos trilhos funcionamento, basta dar uma rotação inicial, e a força

deve ser perpendicular ao plano da railgun. magnética nos fios da bobina produz o torque necessário

para o movimento. Raspar apenas uma das metades de

B) deve ser, necessariamente, contínua e o campo

magnético criado pela corrente que circula nos trilhos um dos fios é necessário porque isso deve ser paralelo ao plano da railgun. A) reduz o consumo de energia à metade, uma vez que

C) deve ser, necessariamente, alternada e o campo a corrente elétrica não circula pelo motor quando a

magnético criado pela corrente que circula nos trilhos

metade isolada do fio está em contato com o arame.

deve ser perpendicular ao plano da railgun. B) faz com que a força magnética que atua em cada fio

D) pode ser contínua ou alternada e o campo magnético da bobina tenha seu valor dobrado em relação ao fio

criado pela corrente que circula nos trilhos deve ser todo descascado. perpendicular ao plano da railgun. C) permite que o torque da força magnética sobre a

E) pode ser contínua ou alternada e o campo magnético bobina seja sempre no mesmo sentido de rotação,

criado pela corrente que circula nos trilhos deve ser o que não aconteceria com o fio todo descascado.

paralelo ao plano da railgun. D) aumenta a resistência da bobina e reduz o valor

da corrente elétrica. Com isso, a força magnética

**02.** aumenta de valor e aumenta a frequência de rotação O motor elétrico é uma máquina destinada a transformar

energia elétrica em mecânica. É o mais usado dos do motor.

motores, pois combina as vantagens da energia elétrica E) transforma a corrente elétrica fornecida pela pilha em

alternada, e isso permite que o torque exercido pela

(baixo custo, facilidade de transporte, limpeza), com

força magnética seja sempre no mesmo sentido de

a grande versatilidade na adaptação às mais diversas

rotações

funções e com os melhores rendimentos. No ano de 1833,

o inglês W. Ritchie inventou o comutador e construiu um



pequeno motor elétrico em que o núcleo de ferro enrolado

## GABARITO

girava em torno de um ímã permanente. Para dar uma

volta completa, a polaridade do eletroímã era alternada

## Fixação

a cada meia volta através do comutador.

Disponível em:

el%C3%A9trico >. Acesso em: 17 mar. 2011 (Adaptação). 02.  
D

03.  
D

Um motor elétrico bem simples pode ser construído em

04.  
A

casa usando uma pilha de 1,5V, um ímã, um suporte de  
madeira, fio esmaltado para a bobina, arames e pregos. 05. A

A figura a seguir mostra a montagem descrita. **Propostos**



01. B 04. B 07. B 10. B 13. B

02. C 05. B 08. B 11. E 14. E

03. D 06. C 09. E 12. D 15. D

16. A)  $M = 8,0 \times 10^{-4} \text{ N.m}$

B) Sentido anti-horário. O equilíbrio é possível com o plano da espira perpendicular às linhas de indução.

## Seção Enem

Disponível em:

[eletrico\\_simples.php](#)>. Acesso em: 17 mar. 2011 (Adaptação).

80 Coleção Estudo

FÍSICA MÓDULO FRENTE

# Indução eletromagnética e 15 D transformadores

Em 1820, Oersted descobriu que uma corrente elétrica Analisando a figura, percebemos que o número de linhas

gera um campo magnético. Em 1831, o cientista Michael de indução magnética que atravessam a bobina se altera

Faraday observou que o fenômeno contrário também é quando o ímã se movimenta em relação a ela. Quando o ímã

possível. Ele percebeu que, em determinadas condições, é aproximado da bobina, o número de linhas que a penetram

um campo magnético é capaz de produzir corrente elétrica. aumenta. Quando ele é afastado, o número de linhas que

Essa descoberta é conhecida como a Lei da Indução a “furam” diminui. Com o ímã parado diante da bobina,

Eletromagnética, um dos legados da Física que mais auxiliou o número de linhas que a atravessam não é alterado.

o homem na busca de novas tecnologias. Assim,

Faraday chegou à seguinte conclusão:

Certa vez, Faraday procurou o Ministro das Finanças



da França para mostrar seu trabalho e foi questionado

Um campo magnético produz corrente elétrica numa

sobre qual seria a utilidade de tais invenções. Faraday

bobina, por exemplo, desde que o número de linhas

respondeu-lhe: “*Um dia, V. Ex.<sup>a</sup> coletará impostos com*

de indução magnética que atravessam o circuito esteja

*elas*”. Para comprovar essa afirmação, basta pensar

que as variando com o tempo. usinas de eletricidade

(hidroelétricas, como Itaipu e Furnas,

ou termoeletricas, como Igarapé e Angra I e II)

funcionam

com base no fenômeno da indução eletromagnética.

**O fluxo magnético ( $\Phi$ )** A geração de

energia elétrica em grande escala foi a mola

propulsora do mundo contemporâneo. Para entender a

Lei da Indução Eletromagnética,

é necessário definir uma grandeza chamada fluxo magnético ( $\Phi$ ). O fluxo magnético é **proporcional ao número de linhas de**

# A INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

indução que atravessam uma determinada superfície

a cada instante (em geral, a superfície de uma espira).

A figura seguinte ilustra uma das experiências realizadas Para que possamos entender o conceito de fluxo magnético

por Faraday durante suas pesquisas. Nesse caso, ele com mais facilidade, vamos, antes, entender o significado de

construiu um circuito que tinha uma bobina com algumas um fluxo de gotas de água. Imagine que você precisa coletar

voltas de fio. O amperímetro de zero central servia para água da chuva em um recipiente. Vamos juntos responder à

detectar a presença de corrente elétrica no circuito. Quando seguinte pergunta: Quais são as grandezas que determinam

ele aproximava o ímã, rapidamente, da bobina, verificava o número de gotas de chuva que atravessam a “boca”

desvio no ponteiro do aparelho, indicando passagem do recipiente a cada instante? Fácil, concorda? Primeiro,

de corrente elétrica pelo circuito. Quando o ímã era, a intensidade da chuva. Chuva mais forte tem maior

número

rapidamente, afastado, o ponteiro se desviava para o outro de gotas por metro quadrado. Segundo, a área da “boca”

lado, indicando uma corrente elétrica em sentido oposto ao da vasilha. Um recipiente de bocal mais largo coleta maior

anterior. Mantendo o ímã parado diante da bobina, nenhuma quantidade de gotas a cada instante. E, por último, o ângulo

corrente era observada. da “boca” do recipiente em relação à chuva. Se o bocal

é colocado perpendicularmente ao movimento da  
chuva,

I o número de gotas recolhidas é grande. Ao contrário,  
se

o Ímã se aproxima girarmos o recipiente, de modo que a  
“boca” fique paralela

-10 +10 das espiras à chuva, nenhuma gota é recolhida pela  
vasilha.

N O mesmo acontece, com o fluxo magnético. A  
intensidade S

do campo magnético externo (chamado campo  
indutor)

I interfere no valor do fluxo, pois um campo  
magnético mais

intenso corresponde a linhas de indução mais concentradas.

Editora Bernoulli 81

## Frente D Módulo 15

Por isso, na figura a seguir, a primeira espira, que se encontra O ângulo  $\theta$  é o ângulo formado entre o vetor campo

em um campo magnético mais intenso ( $|B| > |B|$ ), está magnético e um vetor imaginário normal à superfície da <sub>1 2</sub>

sujeita a um fluxo magnético maior. O número de linhas espira (figura a seguir). Para  $\theta = 0^\circ$ , a espira apresenta que atravessam a espira da esquerda (20) é maior do que a sua face perpendicular às linhas do campo. Nesse caso,

o número de linhas que atravessam a espira da direita (6). o fluxo magnético é máximo e igual a  $B.A$ , pois  $\cos 0^\circ = 1$ .

Para  $\theta = 90^\circ$ , a face da espira é paralela às linhas de indução

$B B_{12}$  e o fluxo magnético é nulo, pois  $\cos 90^\circ = 0$ .

Vetor normal

Assim como a intensidade do campo, a área ( $A$ ) da espira  $\theta$

também influencia o valor do fluxo magnético. A figura

seguinte mostra duas espiras dentro de um mesmo campo

magnético uniforme, no qual as duas espiras apresentam A unidade de fluxo magnético no SI é o weber (Wb), em

suas faces perpendiculares às linhas de indução do campo homenagem ao cientista alemão Wilhelm Weber. Um fluxo

magnético. Naturalmente, a primeira espira, de área maior, magnético de 1,0 Wb corresponde a determinado número de

apresenta o maior valor de fluxo magnético, pois ela é linhas de indução através de um circuito. Se o fluxo passar

“perfurada” por um maior número de linhas de indução (20) para 2,0 Wb, por exemplo, o número de linhas de indução

do que a espira menor (6). que atravessam a área daquele circuito terá dobrado.

B Vimos, anteriormente, que a unidade de medida do



campo magnético era  $U(B) = N/A.m = T$  (tesla).

Usando

a definição de fluxo, podemos obter outra unidade para o

campo magnético no SI. Veja a seguir:

$$\phi = B.A.\cos \theta \Rightarrow B = \phi/(A.\cos \theta) \Rightarrow U(B) = \text{Wb}/\text{m}_2 = T$$

Assim, as duas unidades são idênticas, ou seja,

$$\text{Wb}/\text{m}_2$$

$$= N/$$

$$A.m =$$

$$T.$$

Podemos

usar

qualquer

uma

delas

para

medir o

campo

magnético.

A figura a seguir representa uma espira quadrada sendo

girada dentro de um campo magnético. Na figura à esquerda  $\Delta\phi$ )

(espira paralela ao campo), o fluxo magnético vale

zero, **A variação do fluxo magnético**  
(pois nenhuma linha de indução “fura” a superfície da espira.

Na figura do centro, existe um pequeno fluxo magnético, Vimos, na experiência de Faraday, que o medidor indicava

mas é na figura à direita (espira perpendicular ao campo a passagem de corrente pelas espiras quando havia uma

magnético) que o fluxo é máximo, pois, nesse caso, variação do fluxo magnético. Uma vez que a definição

a superfície da espira é “perfurada” pelo maior número de de fluxo envolve três grandezas (campo, área e ângulo),

linhas de indução magnética possível. a variação do fluxo pode ser conseguida por meio da variação

de qualquer uma destas. Vamos analisar alguns casos.

B B B

## Variação do campo magnético ( $\Delta B$ )

Considere um fio reto, uma espira ou um solenoide

percorrido por corrente elétrica. Em cada ponto próximo

a eles, existe um campo magnético. Se a corrente elétrica

aumentar ou diminuir, o valor do campo magnético  
será mais

Assim, o fluxo magnético em uma espira colocada  
em um intenso ou menos intenso naquele ponto.

Assim, podemos

campo magnético depende da intensidade do campo,  
da variar o fluxo magnético, alterando o valor da  
corrente

área da espira e da inclinação desta em relação às  
linhas elétrica. Isso produzirá uma variação do fluxo  
magnético

de indução. Operacionalmente, o fluxo magnético é  
definido através de uma espira colocada nessa região.

pela seguinte expressão: Sabemos que um ímã  
apresenta um valor de campo

magnético bem definido em cada ponto próximo a ele.



$\phi = B.A.\cos \theta$  Assim, uma forma de variar o fluxo  
magnético em uma

espira, por exemplo, é alterar a distância entre esta e o  
ímã,

Sendo B e A os valores do campo magnético e da  
conforme mostrado na figura seguinte. Nessa  
representação,

área da espira, respectivamente. O ângulo  $\theta$  mede a  
usaremos apenas algumas linhas de indução

magnética para

inclinação da espira em relação ao vetor campo magnético. não poluir muito a figura.

## 82 Coleção Estudo

# Indução eletromagnética e transformadores

## Variação do ângulo ( $\Delta\theta$ )

B Considere uma espira colocada de frente para um ímã

e três eixos de rotação possíveis (x, y e z), conforme

mostrado a seguir. Os eixos x e y estão no plano da

S N folha, e o eixo z é perpendicular a ela e para fora desta.

Observe que o campo magnético atravessa a espira perpendicularmente ao plano formado por ela, e, por isso,

o fluxo magnético é máximo. Se girarmos a espira em

torno do eixo x, ela continuará perpendicular ao campo,

e o fluxo continuará máximo, sem sofrer alteração.

Se o ímã e a espira se aproximam, seja pelo movimento Mas, se a rotação for em torno dos eixos y ou z, após um

dele, dela ou de ambos, o campo magnético que “fura” a quarto de volta, a espira estará paralela ao campo, e o

espira é mais intenso e, assim, o fluxo magnético aumenta. fluxo magnético através dela será nulo. Veja, portanto, que

Se, ao contrário, eles se afastam, o campo magnético é a rotação em torno de y ou z faz variar o fluxo magnético

menos intenso, e o fluxo magnético diminui. Observe que na espira.

o número de linhas de indução que atravessam a espira y diminui à medida que esta é afastada do ímã. O mesmo efeito

seria obtido, mantendo a espira sempre dentro do campo

do ímã, se o ímã fosse deslocado paralelamente à espira,

para cima, para baixo, para a direita ou para a esquerda.

A variação de fluxo também poderia ser obtida deslocando  $\vec{B} \times \vec{N}$

a espira da mesma forma.

# Variação da área da espira ( $\Delta A$ )<sub>z</sub>

Podemos variar a área da espira de duas formas.

Primeiro, variando literalmente o tamanho da espira,

conforme mostrado na figura a seguir. Veja que,

puxando **A LEI DA INDUÇÃO DE**

**FARADAY** a extremidade livre do fio, a área da  
espira fica menor, e o **FÍSICA**

fluxo através dela diminui. Conhecendo o conceito de  
fluxo magnético e suas

possíveis variações, podemos expressar a Lei da  
Indução

Eletromagnética de Faraday da seguinte forma:

B B



Toda vez que o fluxo magnético externo que atravessa um  
circuito fechado **VARIAR** com o passar do tempo, surgirá, no circuito,  
uma força eletromotriz induzida e, portanto,  
uma corrente elétrica induzida.

Na figura seguinte, uma espira de área definida se  
desloca Segundo, alterando a área da espira sujeita ao

campo. O valor médio da força eletromotriz induzida (também chamada de eletromotância induzida) é dado por: entrando e saindo de uma região na qual existe um campo



magnético. A parte cinza mostra a área da espira sujeita  $[\Delta\phi]$  ao campo. Veja que, quando a espira entra no campo,  $\varepsilon N_t = \left| \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \right|$  o fluxo magnético aumenta, quando ela se movimenta,

quando a espira deixa a região onde há o campo magnético, Na equação anterior,  $N$  é o número de espiras,  $\Delta\phi$  é a variação estando totalmente dentro do campo, o fluxo é constante, e,

o fluxo diminui. sofrida pelo fluxo magnético, e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo decorrido nessa variação.

Sabemos que a corrente elétrica pode ser calculada por

$I = \varepsilon/R$ . Dessa forma, a corrente induzida que surge num EQ

B circuito fechado de resistência constante vai depender do

valor da f.e.m. induzida.

Veja, na equação anterior, que a f.e.m. induzida será tanto

maior quanto maiores forem dois fatores básicos:

1. O número de espiras (voltas de fio) do circuito;
2. A taxa de variação temporal de fluxo ( $\Delta\phi/\Delta t$ ).

Editora Bernoulli 83

## Frente D Módulo 15

### EXERCÍCIO RESOLVIDO intervalos

apresentados (30 Wb/s), à exceção do intervalo de

1 s a 2 s, em que a variação do fluxo foi nula. Isso quer dizer

que a f.e.m. média induzida e, portanto, a corrente média

**01.** induzida são as mesmas nos intervalos de 0 a 1 s, de 2 s a 3 s

Considere uma espira de resistência constante, sendo

atravessada por um fluxo magnético hipotético que tem e de 3 s a 4

s. Porém, entre 2 s e 3 s e entre 3 s e 4 s,

a corrente deve ter valor máximo maior que a média.

o seu valor, em função do tempo, dado pelo gráfico a

Fica de “para casa” você explicar isso, usando esse

seguir. Nele, as curvas entre os instantes 2 e 4 são funções

argumen

quadráticas (2º grau). Analisar a variação temporal do



fluxo magnético e construir um gráfico qualitativo da

intensidade da corrente elétrica induzida ( $I_i$ ) que aparece **A**

## LEI DE LENZ

na espira em função do tempo.

90  $\phi$  É muito comum encontrarmos a equação que determina (Wb) a f.e.m. induzida escrita conforme a expressão a seguir:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

30 Observe o sinal negativo na expressão para a f.e.m.

induzida. Esse sinal existe para indicar que a variação de

fluxo estabelece, em um circuito fechado, uma corrente

0 1 2 3 4 t (s) elétrica induzida contrária à sua causa. Quem melhor

**Resolução:** russo Heinrich Lenz. Por isso, chamamos de Lei de Lenz interpretou esse aspecto da Lei de Faraday foi o físico

A intensidade da corrente induzida na espira pode ser a regra para determinar o sentido da corrente induzida,

calculada por  $I = \mathcal{E} / R = (N/R) \cdot (\Delta \phi / \Delta t)$ . Na situação II que, em

palavras, pode ser assim escrita:

desse exercício, temos somente uma espira ( $N = 1$ ) de



(I Em um circuito fechado (espira ou bobina), a corrente  $i$  ) é proporcional apenas à variação temporal do fluxo elétrica induzida apresenta um sentido que resistência elétrica constante. Assim, a corrente induzida

(I **CONTRARIA**  $a \propto \Delta\phi / \Delta t$ ). Em um gráfico de  $\phi \times t$ , a inclinação da  $i$  sua causa (que é a variação do fluxo magnético no circuito). curva é uma medida da variação de fluxo magnético.

Dessa forma, a corrente induzida está relacionada com

a inclinação da curva do gráfico. Para facilitar, lembre-se A Lei de Lenz estabelece uma relação de sentidos entre

de que, na Cinemática, o gráfico  $v \times t$  era obtido a partir os dois campos magnéticos presentes no fenômeno da

da inclinação da curva do gráfico  $s \times t$ . indução eletromagnética: o campo magnético externo

(criado, por exemplo, pelo ímã) e o campo magnético

Entre 0 e 1 s, o gráfico é uma reta. Logo, a inclinação induzido (criado pela própria corrente induzida). Daqui para

do gráfico é constante e, assim, a corrente induzida é frente, chamaremos o campo magnético externo de  $B$

também constante.  $E$  e o campo magnético gerado pela corrente induzida de  $B_i$

Entre 1 s e 2 s, o gráfico é uma reta de inclinação nula. Para que a corrente induzida contrarie a sua causa,

(não existe variação de fluxo). Dessa forma, a corrente **o seu sentido deve ser tal que:**

induzida é igual a zero.

1) Se o fluxo magnético **aumenta**, a corrente elétrica

De 2 s a 3 s, a inclinação aumenta e, claro, a corrente induzida cria um campo B **contrário** ao campo

induzida também aumenta.  $I$  externo B , para tentar conter o aumento do fluxo e  $E$

Entre 3 s e 4 s, a inclinação diminui (tendendo a zero). conservar a energia do sistema.

Assim, a corrente induzida também diminui e tende

a zero. 2) Se o fluxo magnético **diminui**, a corrente elétrica

$I$  induzida produz um campo B no **mesmo sentido** do  $I$

$I$  campo externo B , na tentativa de conter a redução

$E$

do fluxo e conservar a energia do sistema.

A fim de encontrar, de forma mais fácil, o sentido da corrente induzida em qualquer processo, vamos usar

0 a seguinte ordenação de eventos (embora estes não 1 2 3 4 t (s) aconteçam nesta

sequência):

Observe a reta tangente à curva, no instante  $t = 3 \text{ s}$ ,



mostrada no gráfico de  $\phi \times t$ . Podemos perceber que ela  $B \rightarrow \Delta\phi \rightarrow B \rightarrow I_{\text{EII}}$

é mais inclinada do que a reta que representa o valor do

fluxo entre 0 e 1 s. Consequentemente, a corrente é maior

Primeiro, devemos descobrir o sentido do campo magnético

naquele instante do que no primeiro intervalo. Veja, ainda, externo (chamado de campo indutor). A seguir, devemos

que a variação de fluxo magnético foi a mesma em todos os observar a variação do fluxo (se ele está aumentando

## 84 Coleção Estudo

### Indução eletromagnética e transformadores

ou diminuindo). Feito isso, devemos desenhar o sentido do **EXERCÍCIO RESOLVIDO** campo induzido (conforme a regra a seguir). Agora, basta

colocar o dedão no sentido do campo induzido e,

usando a

regra da mão direita, os quatro dedos indicarão o sentido **02**. Uma espira circular de extremidades PQ é colocada da corrente induzida. perpendicularmente aos polos de um solenoide (para

**Resumindo:** simplificar a figura, as espiras do solenoide não foram

desenhadas). O campo do solenoide aponta para cima e



Se o fluxo magnético: o seu módulo pode ser variado. Determinar o sentido da

AUMENTA → desenhar B em sentido **contrário** a B ;  $I_E$  corrente induzida na espira quando o campo do solenoide

DIMINUI → desenhar B no **mesmo** sentido de B . aumenta e, depois, diminui.  $I_E$

**Resolu**

Vejamos, agora, um dos aspectos mais importantes das

leis de Faraday e de Lenz. Quando uma corrente passa por As figuras mostram a situação apresentada. Conhecemos

o sentido do campo externo (para cima). Na primeira

um resistor, existe transformação de energia elétrica em

energia térmica (efeito Joule). Uma vez que surge a corrente figura, o campo está aumentando e, por isso, o campo

induzida e, consequentemente, energia elétrica, algum induzido ( $B$ ) aponta para baixo – contrário a  $B_{\text{ext}}$

elemento presente no processo tem de realizar trabalho Na segunda figura, o campo externo está diminuindo e foi sobre o sistema (e “gastar” da sua própria energia), de desenhado um campo induzido ( $B$ ) para cima – mesmo modo a conservar a energia total dos objetos envolvidos. sentido de  $B_{\text{ext}}$ .

Procure, nas situações apresentadas de agora em diante, s

analisar todas as transformações de energia envolvidas –  $B_{\text{ext}}$  P “quem gasta” qual forma de energia, e “quem ganha” qual

tipo de energia. I Q

Veja a seguir a forma correta de se usar a Lei de Lenz. N 0

Um estudante aproxima e afasta um ímã de uma espira.

Nas situações 1 e 2, o polo norte do ímã está voltado para

a espira. Nas figuras 3 e 4, o polo sul está mais próximo

induzida na espira, vista por cima do ímã, nas quatro B da espira. Vamos determinar os sentidos da corrente s

situações apresentadas. P

Observe, nas duas primeiras figuras, que o campo externo  $B$

(do ímã) está apontado para baixo e, nas outras duas,  $B$  é dirigido para cima.

Nas figuras 1 e 3, o ímã é aproximado da espira (o fluxo

campo induzido ( $B$  do campo induzido, percebemos que a corrente circula, na ) em sentido oposto a  $B$ . Use a regra da mão direita, de P para Q, na primeira situação, e de Q para P, na segunda, com o dedão no sentido do campo induzido, gire magnético através dela aumenta). Assim, desenhamos o Usando a regra da mão direita, com o dedão no sentido

os quatro dedos em torno da espira e confira, nas figuras 1 na segunda. Observe que as correntes têm sentidos

e 3 a seguir, os sentidos das correntes induzidas. opostos, o que pode ser verificado na indicação do

galvanômetro. Confira as figuras anteriores.

1. 2. 3. 4.

V S S S N N V V V

N N S S **ELETROMOTÂNCIA**  
(F.E.M.)

# B B EE BE BE INDUZIDA EM UM FIO

B B II BI BI

I Podemos conseguir uma f.e.m. induzida sem que exista, I I I  
necessariamente, um fluxo magnético variável no tempo.

Observe agora que, nas situações 2 e 4, o ímã é afastado

Considere um fio condutor (ou uma barra de metal) em

da espira (o fluxo magnético que a atravessa diminui). Logo,

de B . Novamente com a regra da mão direita (dedão no <sub>E</sub> condutor, possui elétrons livres. Com o movimento do fio, sentido de B ), determinamos os sentidos das correntes <sub>I</sub> tais elétrons também estão em movimento em relação ao induzidas, mostradas nas situações 2 e 4. campo. Assim, eles sofrem ação de uma força magnética vamos desenhar um campo induzido (B ) no mesmo sentido <sub>I</sub> magnético considerado uniforme. O material, sendo movimento uniforme, por exemplo, onde há um campo

Assim, observaremos correntes induzidas no sentido que os desloca, momentaneamente, dentro do condutor.



horário nas situações 2 e 3 e no sentido anti-horário nas De acordo com a regra do tapa, os elétrons se deslocam

situações 1 e 4. para cima. Veja na primeira figura a seguir:

Editora Bernoulli 85

## Frente D Módulo 15

### F EXERCÍCIO RESOLVIDO

M F m M

m — —

– **03.** Seja uma barra metálica (MN) apoiada sobre suportes

– condutores. Ela é puxada para a direita por um agente F  
B e externo, por meio de uma força F<sub>E</sub>, e se desloca com

v F<sub>m</sub> B velocidade constante, numa região onde o campo

– v E magnético externo (B) é perpendicular ao sistema. E

Determinar os sentidos da corrente induzida e da força

F<sub>m</sub> energia envolvidas nessa situação. magnética que  
atuam na barra e as transformações de

– + **Resolução:**

+ + O sentido da corrente induzida pode ser determinado de

N N duas maneiras. Primeiro, determinando a f.e.m. induzida

Com o deslocamento dos elétrons livres, as extremidades na barra, como foi feito no tópico anterior. Veja a seguir:

do fio ficam com cargas positivas localizadas em N, + e negativas, em M. Isso faz com que um campo elétrico (E), + M Q +

praticamente uniforme, aponte de baixo para cima (dentro v I do fio), conforme mostrado na figura anterior, à direita.

uma situação de equilíbrio, instante em que as forças elétrica  $F_M F_E$  O deslocamento dos elétrons termina quando estes atingirem

e magnética se anulam.  $\varepsilon_I$

O fio com extremidades positiva e negativa equivale a uma  $B_E$

f.e.m. ( --  $\varepsilon$  ) que aponta de M para N. Veja a seguir. Considere  $P - N$  a distância MN igual a L. Assim, a f.e.m. que aparece nas extremidades do fio pode ser calculada por: Aplique a regra do tapa nas cargas livres da barra MN

$F = 0$  ( $F = F$ ) e  $\varepsilon = E.L$  ( $V = E.d$ )  $R_{em}$  ao movimento da barra) e confirme que as extremidades (que se

deslocam para a direita com velocidade  $v$ , devido

$\mathcal{E} = B \cdot l \cdot v$  M e N ficam submetidas a uma f.e.m. induzida ( $\mathcal{E}$ ),  $\Rightarrow \mathcal{E} = B \cdot l \cdot v \Rightarrow \mathcal{E} / L = B \cdot v$

conforme indicado – positivo em M e negativo em N. Assim,

$\Rightarrow \mathcal{E} = B \cdot L \cdot v$  surge, como consequência da f.e.m. induzida, uma corrente

M elétrica induzida ( $I$ ) na espira MNPQ, no sentido anti-horário. – M – Use agora a regra do tapa na corrente que percorre a

barra e você verá que a força magnética é oposta à força do agente externo. Assim, o agente deve realizar trabalho para deslocar a barra, “gastando” parte da sua energia no movimento. Tal energia “aparece”, na espira, na forma de

B

energia elétrica (que vai aquecer a espira), ou seja, houve  $v L$  transformação de energia mecânica (do agente externo)

$\mathcal{E}$

em energia elétrica (na espira).

Outra maneira de determinar o sentido da corrente induzida no circuito é observar a variação do fluxo através da espira. Veja que a barra está se deslocando para a + direita. Assim, o fluxo magnético aumenta com o tempo

$N + N$  (a área da espira MNPQ, sujeita ao campo, aumenta).

Se uma lâmpada for, convenientemente, conectada

entre Assim, basta desenhar um campo induzido ( $B$ ) oposto  $I$   
os pontos M e N, ela será percorrida por uma corrente  
elétrica ao campo externo ( $B_E$ ). Veja a seguir:

como se o fio MN (ou a barra) fosse uma genuína  
bateria. M Q

Quando uma corrente elétrica é produzida por uma  
pilha

ou por uma bateria, a energia química se transforma  
em  $I v$  energia elétrica. No caso da geração de corrente  
elétrica

induzida, utilizando as leis de Faraday e de Lenz, ela  
surge  $B_I F_E$  como consequência da transformação de  
energia mecânica

em energia elétrica. A seguir, vamos apresentar um  
exemplo  $B_E$  que nos permitirá compreender melhor tal  
transformação de energia. P N

## 86 Coleção Estudo

# Indução eletromagnética e transformadores

Se você apontar o dedão da mão direita no sentido do Enquanto  
a bobina gira, o fluxo magnético em seu

campo induzido (aponte para os seus olhos) e girar a mão interior varia. Segundo a Lei de Faraday, uma força

em torno dele, os quatro dedos da mão indicarão o sentido eletromotriz é induzida entre os terminais da bobina,

da corrente induzida, conforme mostrado. O restante da e uma corrente elétrica flui através do circuito. Essa corrente

discussão é idêntico ao da primeira solução e será omitido. É alternada, isto é, ora ela percorre o circuito em um sentido,

**Observação:** ora em sentido oposto. Por isso, o gerador de CA também Despreze quaisquer tipos de atrito na análise

a seguir. O que aconteceria com a barra do exemplo anterior é conhecido como alternador. Para entender isso, considere

se o agente externo deixasse de fazer força ou se a barra O instante mostrado na figura e observe que o plano da

tivesse sido lançada sobre os suportes condutores? Veja, bobina se acha em posição horizontal. Nessa condição,

no Exercício Resolvido, o sentido da força magnética que o fluxo magnético vale zero, pois não há nenhuma linha

atua na barra – em sentido oposto ao movimento dela. de campo magnético passando através da área da bobina.

Dessa forma, a barra tende ao repouso, ou seja, a força À medida que a bobina gira e o seu plano começa a se

magnética que surge como consequência da corrente inclinar, a área da bobina é perfurada por algumas linhas

induzida é sempre oposta ao movimento que gerou essa de campo magnético, e o fluxo magnético, em seu interior,

corrente. Assim, dizemos que essa força tende a neutralizar começa a aumentar. Nesse caso, de acordo com a Lei de

a ação que gera a corrente induzida – outra forma de expor a Lenz, a corrente induzida tem um sentido que determina o

Lei de Lenz. A esse fenômeno, damos o nome de Frenagem surgimento de um campo magnético de sentido oposto ao

Eletromagnética. Ele é o responsável, por exemplo, pela do campo indutor (campo do ímã). Aplique você mesmo a

redução de velocidade dos famosos trens-balas. regra da mão direita e veja que essa corrente tem o sentido

horário em relação a você, percorrendo a resistência R no

sentido indicado na figura anterior.

## GERADOR DE CORRENTE

Agora, considere que a bobina da figura anterior tenha

acabado de completar  $1/4$  de volta em relação à posição

## ALTERNADA

mostrada na figura. Nesse novo

instante, o plano da bobina está

passando pela posição vertical, e o fluxo magnético é máximo.

À medida que a espira continua a girar, o fluxo diminui.

**Princípio de funcionamento** Por isso, o sentido da corrente induzida deve determinar

A figura a seguir mostra o esquema de um gerador o surgimento de um campo magnético no mesmo sentido **FÍSICA**

do campo do ímã. Em relação a você, a corrente induzida

de corrente alternada simples. Esse dispositivo é uma no circuito externo apresentará o sentido anti-horário,

bobina que gira em um campo magnético uniforme. sendo, portanto, invertida em relação à primeira análise

Para simplificar a figura, representamos a bobina que fizemos. com apenas uma espira, embora, na prática, ela seja

constituída por centenas ou até milhares de voltas. Você notou que a inversão da corrente elétrica, na bobina

A bobina é acoplada em um eixo (não mostrado na figura). do gerador da figura anterior, ocorre exatamente quando a

Esse eixo é acionado por uma fonte de energia mecânica, bobina passa por uma posição na qual o fluxo magnético

que pode ser uma turbina hidráulica, uma manivela é máximo? Isso significa que a corrente possui valor nulo

manual ou outro dispositivo qualquer capaz de impor quando o fluxo é máximo. Não há nenhuma inconsistência

rotação ao sistema. O circuito elétrico externo é constituído nesse fato, pois a corrente elétrica induzida depende da taxa

por uma carga, aqui representada pela resistência  $R$ . de variação do fluxo magnético e não do fluxo propriamente

Os terminais da bobina são conectados ao circuito externo, dito. Assim, quando o plano da bobina passa pelas posições

por meio de anéis metálicos que giram junto com a bobina. verticais, apesar de o fluxo magnético ser máximo, a taxa

Esses anéis fazem um contato móvel e abrasivo com escovas de variação desse fluxo é, nesse momento, nula. de grafita fixadas no circuito externo.

Campo magnético

**TRANSFORMADOR**



# Escovas de grafita **Princípio de funcionamento**

N

Corrente CA Um transformador elétrico é um dispositivo usado para

s modificar o valor de uma tensão alternada, aumentando-a ou

diminuindo-a conforme a necessidade. Essa transformação

é possível, porque a variação do campo magnético gerado

Bobina por uma corrente alternada é capaz de induzir uma f.e.m.

R

em um circuito vizinho. O princípio de funcionamento

Anéis coletores

de um transformador, portanto, é baseado na Lei da Indução Eletromagnética.

Editora Bernoulli **87**

**Frente D Módulo 15**

A figura a seguir mostra um transformador padrão. Da mesma forma, a variação do fluxo induz uma diferença

O equipamento é constituído por duas bobinas independentes, de potencial entre os terminais do enrolamento do circuito

enroladas em torno de um núcleo de ferro (na forma da primário. Vamos chamar essa d.d.p. de  $U$  (e não de  $V$ , pois a letra  $O$ ). Uma das bobinas é alimentada por uma fonte de reservamos essa denominação para a tensão de entrada

tensão alternada e é denominada bobina ou enrolamento que alimenta o primário). De acordo com a Lei de Faraday,

do circuito primário. A outra é a bobina ou enrolamento do o valor da d.d.p. induzida  $U$  é igual a:  $U_1$  circuito secundário. As bobinas do primário e do secundário

possuem  $N_1 U_1 = N_2 \Delta\phi/\Delta t$  e  $N_2$  espiras, respectivamente. Para facilitar o

entendimento da figura seguinte, representamos as bobinas No circuito primário, se a resistência do enrolamento for

com poucas espiras, embora, na prática, os transformadores desprezível (essa hipótese é razoável), a d.d.p.  $U$  deve ser  $U_1$  sejam fabricados com centenas e até milhares delas. igual à tensão de alimentação  $V$ . Matematicamente, temos:  $U_1$

$$V_1 = U_1 = N_1 \cdot \Delta\phi / \Delta t$$

Como o núcleo de ferro confina as linhas de indução em seu

interior (a fuga de fluxo magnético é desprezível), o campo

e o fluxo magnético são os mesmos nos dois enrolamentos.

Por isso, a taxa de variação do fluxo também é a mesma

nos dois enrolamentos. Então, combinando as equações

que fornecem  $V_1$  e  $V_2$  e cancelando as taxas de variação do

Enrolamento do fluxo, obtemos a equação desejada:



Enrolamento do secundário

$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

$$S_1 = S_2$$

de CA Fonte Essa expressão pode ser usada para obter a relação  $V_1 / V_2 = N_1 / N_2$  entre os valores instantâneos, ou entre os valores médios,

das tensões no circuito primário e no secundário.

Analisando

a equação, vemos que a tensão de saída é diretamente

proporcional ao quociente  $N_2/N_1$ . Por exemplo, se o número

Quando uma tensão alternada  $V_1$  é aplicada no circuito de espiras da bobina do secundário for o dobro do número

primário, uma tensão  $V_2$ , também alternada, é induzida de espiras da bobina do primário, então, teremos  $V_2 = 2V_1$  no circuito secundário. Para  $N_2 > N_1$ , a variação de fluxo Um transformador desse tipo é chamado de transformador

magnético no circuito secundário é grande, e a tensão de de alta, pois serve para elevar a tensão. No caso contrário,

saída  $V_2$  é maior que a tensão de entrada  $V_1$ . Para  $N_2 < N_1$ , o aparelho é chamado de transformador de baixa.

ocorre o inverso, isto é, a tensão  $V_2$  é menor que  $V_1$ . Alguns carregadores de baterias automotivas possuem

um transformador de baixa. Alimentado por uma tensão

**Cálculo da tensão de saída**  $V_2 = 120\text{ V}$   
de uma tomada, esse transformador abaixa a tensão para  $V_1 = 12\text{ V}$ . Nesse caso, se o número de espiras

Agora, vamos deduzir uma equação simples para calcular no primário for  $N = 500$ , então o número de espiras no <sub>1</sub>

a tensão de saída em um transformador, em função da secundário deverá ser  $N = 50$ , pois a relação  $V_2/V_1$  é igual a tensão de entrada e do número de espiras existentes nos a  $1/10$ .

por uma tensão elétrica, uma corrente elétrica passa por Na figura anterior, em que representamos um dois enrolamentos. Quando o circuito primário é alimentado

seu enrolamento. Como consequência, um campo magnético transformador, o que acontecerá se a chave S for fechada? <sub>2</sub>

aparece não apenas no enrolamento primário, como também A resposta é que haverá uma corrente alternada

no enrolamento secundário, pois o núcleo de ferro, além de  $I = V/R$  no circuito secundário (R é a resistência de carga <sub>2 2</sub>

intensificar o campo, permite que as suas linhas de indução do secundário). Essa corrente cria um fluxo magnético extra

se estendam até o enrolamento do secundário. no núcleo do transformador. Apesar disso, a taxa de variação

do fluxo magnético não é alterada. Mesmo com a presença de

circuito primário é alimentado por uma fonte de tensão sendo determinada pela tensão de entrada  $V_1$ . O mesmo ocorre com a tensão alternada  $V_2$ . Uma variação de fluxo magnético ocorre nos enrolamentos. Na figura anterior, considere que o enrolamento do primário tem uma carga no secundário, a taxa de variação do fluxo continua

dois enrolamentos. Assim, de acordo com a Lei de Faraday, corrente  $I_2$  com a tensão de saída. A explicação para isso é que o valor da tensão induzida  $V_2$  entre os terminais do secundário. O crescimento dessa corrente gera maior  $I_1$ , no primário, aumenta quando a carga é introduzida

enrolamento do secundário de valor. O valor da tensão induzida  $V_2$  que compensa a variação de fluxo oposta induzida  $V_1$  é dado por:  $V_2 = N_2 \Delta\phi / \Delta t$  causada pelo aparecimento da corrente  $I_1$ . Uma experiência

$V = N \cdot \Delta\phi / \Delta t$  simples que comprova o aumento de  $I_1$  consiste em ligar uma lâmpada

## 88 Coleção Estudo

# Indução eletromagnética e transformadores

lâmpada em série com a bobina do primário. Com a chave S No caso de um transformador de alta ideal, a

corrente<sub>2</sub>

aberta, essa lâmpada brilha pouco, mas, com a chave fechada, de saída é menor do que a de entrada, a fim de que a

a lâmpada brilha muito mais. A conclusão mais importante potência do primário seja igual à potência do secundário.

que tiramos dessa discussão, e que você deve reter, é que a No caso real, o rendimento do transformador é menor que

tensão de saída  $V$  pode ser calculada pela equação anterior,  $\frac{V_2}{V_1} = 100\%$ , e, conseqüentemente, a corrente de entrada do

existindo ou não uma carga no secundário.

transformador real é um pouco maior que a corrente que

entra no transformador ideal.

**Potência e rendimento de um** No próximo e último tópico deste módulo, que é dedicado **transformador** ao estudo do transporte da energia elétrica das usinas até

em um transformador. No núcleo de um transformador, Agora, vamos discutir as transformações de energia são peças fundamentais nesse processo. os locais de consumo, veremos por que os transformadores circulam correntes parasitas,

induzidas pela variação do  
fluxo magnético. Esse é um dos motivos que explicam  
por que um transformador fica quente durante o seu  
**TRANSPORTE DA ENERGIA**

funcionamento. As correntes parasitas que circulam  
**ELÉTRICA** pelo transformador ocasionam perdas  
de energia por

efeito Joule, devido às próprias resistências das  
bobinas.

Para minimizar os efeitos das correntes parasitas, os  
núcleos

dos transformadores são formados por lâminas de  
ferro **Transmissão em alta tensão**  
montadas lado a lado, separadas por um esmalte  
isolante.

Veja, novamente, o transformador mostrado na figura  
Anteriormente, estudamos a produção da corrente  
anterior e observe o seu núcleo laminado. alternada  
por meio dos geradores elétricos. Quase toda

prática, não existe), a potência elétrica aplicada ao  
primário é turbina é convertida em energia elétrica  
por meio de igual à potência elétrica de saída.  
Matematicamente, isso se um gerador de CA. No



Brasil, quase 80% da energia traduz pela seguinte equação: elétrica utilizada provêm de usinas hidroelétricas, como **FÍSICA** Para um transformador sem perdas (equipamento que, na onde a energia mecânica de rotação do eixo de uma energia elétrica utilizada no mundo é obtida em usinas,

P pode ser constatado no diagrama mostrado na figura

$$P_a = P \Rightarrow V_1 I_1 = V_2 I_2$$

seguir. O grande potencial hídrico do nosso país é um

No caso real, definimos o rendimento, ou a eficiência, bem precioso, uma vez que a energia elétrica gerada a

de um transformador pela seguinte relação: partir dessa fonte é mais barata, além de causar menores



impactos ambientais.

$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_2 I_2}{V_1 I_1}$  Importação: 7,9%  
Gás industrial:

1,0%

Por exemplo, se um transformador ideal ( $\eta = 100\%$ ) com

$V_1 = 120 \text{ V}$ , e o secundário for conectado a uma

Hidro: 77,4% resistência  $R = 10 \text{ N} / \text{N} = 10$  for  
alimentado com uma tensão alternada Biomassa: 1 2

$\Omega$ , teremos uma tensão alternada  
Derivados de

de saída  $V = 12 \text{ V}$ . Além disso, as correntes na 2  
petróleo: 2,8% resistência e no primário serão  $I = 1,2 \text{ A}$  e  
 $I = 0,12 \text{ A}$ , 2 1

respectivamente (faça os cálculos para obter esses  
valores). Carvão mineral: Agora, vamos considerar que o  
rendimento desse mesmo 1,3%

A tensão  $V_{\text{Nuclear}}$ : continuará sendo  $12 \text{ V}$ , e a corrente  
na resistência 2 3,6% 2,5% também continuará sendo  $1,2$   
 $\text{A}$  (por quê?), mas a corrente transformador seja  $\eta =$   
 $0,80$  (rendimento de 80%). Gás natural: no circuito  
primário mudará de valor. *Fonte: Ministério de Minas e Energia.*

foi maior do que a corrente no primário do  
transformador Observe que a corrente no primário do  
transformador real  $\eta V I . 12 1 2 . ,$  A figura seguinte  
mostra o corte de uma usina hidroelétrica. 2 2  $= \Rightarrow 0 8$   
 $0 , = \Rightarrow I = 0 1 5 , A V I . 120 . I_1$  Nesse tipo de  
usina, a energia potencial gravitacional da água 1 1 1  
armazenada na represa é convertida em energia  
cinética de rotação do eixo da turbina hidráulica. No  
gerador elétrico, a energia cinética é transformada em  
energia elétrica, que é ideal. Quanto menor for o  
rendimento de um transformador distribuída para os  
centros de consumo por meio da corrente de baixa,  
maior será a corrente no primário e maior será

a dissipação de calor por efeito Joule no enrolamento do alternador. Essa corrente é transportada a longas distâncias

circuito primário. através de linhas de transmissão.

Editora Bernoulli 89

## Frente D Módulo 15

Observe o transformador mostrado na parte direita da

figura. Esse equipamento é um transformador de alta, cuja função é elevar o valor da tensão gerada na usina.

Em geral, a tensão alternada de saída, gerada nas grandes usinas, é cerca de 10 mil volts. O transformador da usina

aumenta essa tensão para valores como 100 mil volts, ou

muito mais, quando a distância que separa a usina do local

de consumo é muito grande. Por exemplo, o Sistema de

Transmissão de Itaipu, cujas linhas de transmissão cruzam A) vertical para baixo e vertical para baixo. 900 km, desde o estado do Paraná até São Paulo, possui B) vertical para cima e vertical para baixo.

linhas de corrente alternada de 750 kV. Uma das linhas de C) vertical para cima e vertical para cima.

transmissão da usina de Três Gargantas, na China, opera com D) vertical para baixo e nula. a tensão de 500 kV e possui uma extensão de quase 200 km. E) nula e vertical para cima.

**02.** (CEFET) Uma espira condutora quadrada é colocada no

Reservatório mesmo plano e ao lado de um circuito constituído por Casa de força

Transformador uma pilha, uma lâmpada e um interruptor ligado, como

Canal Gerador mostra a figura a seguir. Dentre os procedimentos a

seguir, assinale V para aqueles que produzem corrente elétrica induzida na espira e F para os que não produzem.

Duto

Lâmpa

Turbina

Rio Interruptor

Pilha

O transporte de energia elétrica em altas tensões permite

reduzir muito as perdas de energia em uma linha de Espira transmissão. A potência fornecida pelo gerador de uma usina

é dada por  $P = \varepsilon \cdot I$ , sendo  $\varepsilon$  a f.e.m. (tensão) induzida no gerador e  $I$  a corrente elétrica correspondente. De acordo ( ) Manter ligado o interruptor e afastar a espira.

com o Princípio da Conservação da Energia, a potência  $P$  ( ) Manter ligado o interruptor e manter a espira em

deve ser conservada. Assim, quando a tensão é elevada repouso.

no transformador da usina, o valor da corrente diminui. ( ) Desligar e ligar o interruptor mantendo a espira em Como resultado, as perdas de energia na linha de transmissão repouso. sofrem uma redução proporcional ao quadrado da redução

de  $I$ , pois essas perdas valem  $r \cdot I^2$ . A sequência **CORRETA** encontrada é 2 , sendo  $r$  a resistência elétrica dos fios. O transporte da energia elétrica é realizado, A)  $V F V F$ .

portanto, em alta tensão e baixa corrente. O motivo B)  $V F V$ .

principal da escolha da transmissão por corrente alternada C) F F V. é a facilidade que esta proporciona para alterarmos o valor D) V V F. da tensão por meio de transformadores elétricos.

**03.** (UFSM-RS) As usinas geradoras de energia elétrica

produzem \_\_\_\_\_ que permite, através de um

**EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO** transformador,  
e elevar a \_\_\_\_\_ e, assim, diminuir a

\_\_\_\_\_, de modo a diminuir as perdas

de energia por efeito Joule nas linhas de transmissão.

**01.** (UFV-MG-2007) A figura a seguir ilustra um ímã cilíndrico  
Assinale a alternativa que preenche **CORRETAMENTE**

que é abandonado acima de uma espira condutora situada as  
lacunas.

num plano horizontal, no campo gravitacional da Terra. A) tensão –

corrente elétrica – tensão

Após ser abandonado, o ímã cai verticalmente, passando B) corrente contínua – corrente elétrica – tensão

pelo centro da espira. Desprezando-se a resistência do ar,

C) corrente alternada – tensão – corrente elétrica

é **CORRETO** afirmar que as forças que a espira exerce

no ímã quando este está se aproximando e, depois, D) corrente contínua – tensão – corrente elétrica

se afastando da mesma são, respectivamente, E) corrente alternada – corrente elétrica – tensão













## Indução eletromagnética e transformadores

**04.** (UFMG) Um anel metálico (A) e um disco metálico (D), Nesse caso, a bobina do primário é ligada à rede elétrica

de mesmo tamanho e mesma massa, presos a um fio e a do secundário, ao circuito do aparelho eletrônico.

de seda são postos a oscilar na forma de um pêndulo, Com base nessas informações, responda:

conforme a figura. Eles passam por uma pequena região A) Esse transformador pode ser usado em uma rede

onde existe um campo magnético, perpendicular ao seus elétrica de corrente contínua? **JUSTIFIQUE** sua

planos de oscilação. Os atritos são desprezíveis. A respeito resposta de seus movimentos, é **CORRETO** afirmar que B) Considere que, nesse transformador, as perdas de energia e as resistências elétricas das bobinas são desprezíveis e que a resistência equivalente do circuito ligado na bobina do secundário é de  $30\ \Omega$ . A **CALCULE** a corrente na bobina do primário.

## X X EXERCÍCIOS PROPOSTOS

X X B **01.** (UFV-MG) As figuras a seguir representam uma espira e um ímã próximos. Das situações que se seguem, a que **NÃO** corresponde à indução de corrente na espira é aquela em que

D

N S

X X

X X B A) a espira e o ímã se afastam.

B) a espira está em repouso e o ímã se move para cima.

A) o disco diminui sua oscilação e o anel oscila C) a espira se move para cima e o ímã para baixo. **FÍSICA**

indefinidamente. D) a espira e o ímã se aproximam.

E) a espira e o ímã se movem com a mesma velocidade

B) o anel diminui sua oscilação e o disco oscila

para a direita.

indefinidamente.

C) os dois diminuem suas oscilações e param ao mesmo **02.** (FCMMG) A figura mostra um circuito elétrico posicionado

tempo. num plano vertical, alimentado por uma bateria, contendo

D) os dois diminuem suas oscilações e o disco para um resistor variável R. Ao lado do circuito, existe uma

primeiro. espira retangular de fio condutor, suspensa por um cordão isolante, que passa por uma roldana fixa. A seguir, são

**05.** listadas ações que provocam o aparecimento de uma (UFMG) O circuito de um aparelho eletrônico é projetado

para funcionar com uma diferença de potencial de 12 V. corrente induzida na espira, **EXCETO**

Para esse aparelho poder ser ligado à rede elétrica

de 120 V, utiliza-se um transformador, que reduz a

diferença de potencial. Esse transformador consiste Espira

em um núcleo de ferro, em que são enroladas duas

bobinas – a do primário e a do secundário –, como Q

mostrado nesta figura:

P

R

Secundário

Primário A) Girar a espira em torno do cordão que a sustenta.

B) Variar a resistência  $R$ , mantendo a espira em repouso  
no ponto P.

C) Subir a espira do ponto P ao Q, puxando o cordão.

D) Afastar o circuito da espira, mantendo a espira em  
repouso no ponto P.

Editora Bernoulli 91

## Frente D Módulo 15

**03.** (UFMG–2009) Sabe-se que uma corrente elétrica pode **05.**

(UFMG–2006) Rafael utiliza duas bobinas, uma pilha, um

ser induzida em uma espira colocada próxima a um cabo interruptor  
e um amperímetro para fazer a montagem

de transmissão de corrente elétrica alternada, ou seja, mostrada  
nesta figura:

uma corrente que varia com o tempo. Considere que Bobina

uma espira retangular é colocada próximo a um fio reto A

e longo de duas maneiras diferentes, como representado

Amperímetro

nestas figuras:



Bobina

Interruptor

Ele liga uma das bobinas em série com a pilha e com o interruptor, inicialmente, desligado. A outra bobina, ele a

A A

conecta ao amperímetro e a coloca próximo à primeira.

Fio Em seguida, Rafael liga o interruptor no instante  $t$  e Fio 1

desliga-o no instante  $t_2$ . Assinale a alternativa cujo gráfico **MELHOR** representa a corrente no amperímetro, em função do tempo, na situação descrita.

I II A)

Na situação representada em I, o fio está perpendicular

ao plano da espira e, na situação representada em II, Corrente  $t$   $t_2$  o fio está paralelo a um dos lados da espira. Nos dois 1 Tempo

casos, há uma corrente alternada no fio. Considerando-se

essas informações, é **CORRETO** afirmar que uma corrente B)

elétrica induzida na espira

A) ocorre apenas na situação I.  $t_2$  Corrente  $t_1$  Tempo B) ocorre apenas na situação II.

C) ocorre nas duas situações.

C)

D) não ocorre em qualquer das duas situações.

**04.** Corrente (UFV-MG) A figura a seguir ilustra duas situações  $t_1$   $t_2$   
Tempo

diferentes nas quais uma mesma espira fechada pode se

encontrar. Na situação 1, a espira se encontra numa região

com campo magnético  $D) B$ . Na situação 2, a mesma espira

se encontra próxima de uma outra espira, esta, por sua

a seguir relacionadas, assinale a **t<sub>1</sub> ÚNICA** vez, percorrida por uma corrente  $i$ . Entre as alternativas Corrente na qual será  $2 t$  Tempo

gerada corrente elétrica na espira fechada.

**06.** (FCMMG–2007) Um carrinho possui nas suas bordas uma

$B$  e espira retangular ligada a um pequeno alto-falante muito

sensível, pois qualquer corrente elétrica, por menor que

seja, fará com que ele emita som. O carrinho se move

numa superfície horizontal em cujas proximidades existe

um campo magnético representado, na figura a seguir,

pela região delimitada pelas linhas tracejadas e pelas

cruzes. O alto-falante emitirá som quando o ponto  $P$  do

Figura 1 Figura 2

- A) Campo magnético  $B$  intenso e constante
- B) Campo magnético  $B$  fraco e variável
- C) Corrente elétrica  $i$  grande e constante A B C D
- D) Campo magnético  $B$  fraco e constante A) A e C. C) B e D.
- E) Corrente elétrica  $i$  pequena e constante B) A e B. D) C e D.











# Indução eletromagnética e transformadores

**07.** (CEFET-MG) A figura ilustra uma espira circular, ligada a um galvanômetro G, e um ímã parado, com uma das extremidades no ponto P. Dessa forma, o ponteiro do

**V**

galvanômetro permanece na posição indicada. As ações executadas com esse ímã, ao longo da reta que une os pontos P e Q, consistem em

**B**

Espira

A) alternada e de intensidade constante.

B) alternada e de intensidade variável.

G Q P C) contínua, de sentido horário e de intensidade constante.

Ímã D) contínua, de sentido anti-horário e de intensidade

variável.

E) contínua, de sentido anti-horário e de intensidade constante.

**I. aproximá-lo da espira até a posição Q. 09.** (UFMG)  
Na figura a seguir, representa-se um ímã

prismático, com seu polo norte voltado para baixo. Esse

**II. mantê-lo parado no ponto Q, durante um certo**

ímã foi abandonado e cai passando pelo centro de uma  
intervalo de tempo. espira circular situada em um plano horizontal.

III. afastá-lo da espira, de volta à sua posição inicial. e  $F_{ei}$  as forças do ímã sobre a espira e da espira sobre o

ímã, respectivamente. Enquanto o ímã se aproxima do

As **POSSÍVEIS** indicações do ponteiro do galvanômetro

plano da espira, pode-se afirmar que

nas ações I, II e III, são, respectivamente,

S

A)

## FÍSICA

B) N

C) M P

N

D)

A)  $F_{ie}$  é vertical para cima, e  $F_{ei}$  é vertical para baixo.

B)  $F_{ie}$  é vertical para cima, e  $F_{ei}$  também é vertical para

E) cima.

C)  $F$  é nula, e  $F$  também é nula.  $ie\ ei$

D)  $F_{ie}$  é vertical para baixo, e  $F_{ei}$  é vertical para cima.

**08.** (UFV-MG–2006) A figura a seguir ilustra a situação E)  $F_{ie}$  e  $F_{ei}$  têm direções e sentidos indeterminados.

inicial de uma haste metálica AB, de resistência elétrica

constante  $R$ , em contato com uma outra haste também **10.** (UFMG) Considere a figura da questão anterior. Sejam  $i_1$  e  $i_2$ ,

metálica, em forma da letra C e de resistência elétrica respectivamente, as correntes na espira quando o ímã se

desprezível. A partir do instante ilustrado, a haste AB é aproxima e quando se afasta dela. Sobre as correntes na

deslocada horizontalmente para a direita com velocidade  $v$ , pode-se afirmar que

constante  $v$ , mantendo, durante o movimento, contato

elétrico com a outra haste, configurando, assim, um A)  $i_1$  está no sentido MNP, e  $i_2$ , no sentido MPN.

circuito fechado. Durante todo o tempo, o conjunto B)  $i_1$  está no sentido MPN, e  $i_2$ , no sentido MNP.

encontra-se sob um campo magnético  $B$ , constante C)  $i_1$  está no sentido MNP, e  $i_2$  é nula.

e uniforme, saindo perpendicularmente do plano da D)  $i_1$  e  $i_2$  estão no sentido MNP. <sub>1</sub>

página. A corrente elétrica que surge no circuito, devido <sub>2</sub>

ao movimento da haste AB, é E)  $i_1$  e  $i_2$  estão no sentido MPN. <sub>1 2</sub>

Editora Bernoulli **93**

## Frente D Módulo 15

**11.** (CEFET-MG–2007) A barra metálica AB, movendo-se com velocidade constante  $v$ , apresenta uma separação de

cargas com acúmulo de elétrons em A. Esse efeito pode ter sido provocado por um campo magnético uniforme \_\_\_\_\_ ou por um campo elétrico uniforme \_\_\_\_\_ na região. Anel de plástico Anel de cobre

A opção que completa, **CORRETA** e respectivamente,

Ele, então, aproxima rapidamente o ímã, primeiro, do as lacunas é:

anel de plástico e, depois, do anel de cobre. Com base v nessas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) os dois anéis se aproximam do ímã.

B) o anel de plástico não se movimenta e o de cobre se

A B

afasta  
do  
ímã.

A) saindo da folha / de B para A C) nenhum dos anéis se movimenta.

B) saindo da folha / de A para B D) o anel de plástico não se movimenta e o de cobre se

aproxi  
do  
ímã.

C) de A para B / saindo da folha

D) de B para A / entrando na folha **14.** (UFRN / Adaptado) Pedro colocou em sua bicicleta

E) entrando na folha / de A para B um dínamo que alimenta uma lâmpada de 12 V. Num

dínamo de bicicleta, a parte fixa (estator) é constituída

**12.** (UFMG) Um aro metálico com uma certa resistência de bobinas, onde é gerada a corrente elétrica, e de uma

elétrica desce um plano inclinado. Em determinada parte móvel (rotor), onde existe um ímã permanente,

trecho, ele passa por uma região em que existe um que gira devido ao contato do eixo do rotor com o pneu

campo magnético, como mostra a figura. Com relação a da bicicleta.

essa situação, é **CORRETO** afirmar que

Lâmpada

Campo

magnético Dínamo

entrando

no plano Figura I: da folha  
Parte dianteira da bicicleta

Lâmpada

A) o campo magnético não influenciará no tempo de

descida do aro. P Q

B) nada se pode dizer sobre a influência do campo Figura II: Ímã magnético no tempo de queda, sem conhecer a Esquema do dínamo Bobina resistência elétrica do aro. N S em certo instante fixa Rotor C) o tempo gasto pelo aro, para atingir a base do plano,

é maior do que o tempo que ele gastaria se o campo

magnético não existisse. Usando a descrição anterior e os seus conhecimentos de

Física, pode-se afirmar:

D) o tempo gasto pelo aro, para atingir a base do plano,

é menor do que o tempo que ele gastaria se o campo A) A energia por unidade de tempo emitida pela lâmpada

magnético não existisse. mostrada na figura I não depende da velocidade da

bicicle

**13.** (UFMG) Considere a situação descrita a seguir. B) No instante representado na figura II, o sentido

Em uma aula, o prof. Antônio apresenta uma montagem correto da corrente elétrica induzida é do ponto Q

com dois anéis dependurados, como representado na para o ponto P.

figura a seguir. C) A conversão de energia mecânica em energia elétrica

Um dos anéis é de plástico – material isolante – e o outro ocorre devido à variação temporal do fluxo magnético

é de cobre – material condutor. nas espiras (figura II).

Em seguida, o prof. Antônio mostra que o anel de plástico D) A velocidade angular do rotor (figura II) tem de

e o de cobre não são atraídos nem repelidos por um ímã ser igual à velocidade angular do pneu da bicicleta

que está parado em relação a eles. (figura I), para a lâmpada funcionar.

**94** Coleção Estudo

Indução eletromagnética e transformadores

**15.** (UFRN–2010) As usinas nucleares funcionam a partir da grande quantidade de calor liberada pelas reações nucleares. O

calor é absorvido por um circuito de água primário, do tipo ciclo fechado. Esse circuito fica em contato com outro, o circuito

secundário, que, por sua vez, produz vapor de água à alta pressão, para fazer girar uma turbina capaz de acionar um gerador

elétrico, conforme mostra, esquematicamente, a figura a seguir.

Reator Torre de Turbina a vapor refrigeração

Vapor

de

água Gerador

elétrico

Condensador

Circuito primário Circuito secundário

Rio, lago ou mar

Com base nas informações anteriores, a sequência **CORRETA** das principais formas de energia envolvidas nesse processo é

A) energia nuclear, energia mecânica, energia potencial e energia elétrica.



B) energia nuclear, energia mecânica, energia térmica e energia elétrica.

C) energia nuclear, energia potencial, energia mecânica e energia elétrica.

D) energia nuclear, energia térmica, energia mecânica e energia elétrica.

## FÍSICA

**16.** (UFV-MG-2007) As figuras a seguir representam diferentes arranjos de transformadores num sistema de transmissão de

energia elétrica.  $N_A$ ,  $N_B$ ,  $N_C$  e  $N_D$  representam o número de voltas dos enrolamentos nos transformadores. Supondo que  $N_A < N_B$  e que  $N_C > N_D$  o arranjo **CORRETO** de transformadores para a transmissão de energia elétrica desde a usina até a

casa, por uma rede muito longa, é

A) Usina Casa D) Usina Casa

$N_A N_B N_C N_D N_C N_B N_A$

$N_A N_B N_C N_D N_C N_B N_A$

B) Usina Casa E) Usina Casa

$N_A N_B N_C N_D N_C N_B N_A$

$N_A N_B N_C N_D N_C N_B N_A$

C) Usina Casa

## Frente D Módulo 15

**17.** (UFG-GO) A energia elétrica que chega às residências, C) A bobina é constituída por dois enrolamentos:

ao comércio e à indústria é transportada por linhas de o primário e o secundário. A corrente variável

transmissão na forma de corrente alternada. Sobre essa que atravessa o primário induz a alta tensão no

modalidade de transporte de energia elétrica, julgue as secundário.

afirmações que se seguem: D) A bobina é um transformador de potência elétrica que

I. A transmissão por corrente alternada consolidou-se ao aumenta a energia do enrolamento primário para uma

longo dos anos, mas não é a forma mais conveniente energia que atinge milhares de volts no enrolamento

de transmissão devido às oscilações na voltagem e secundário.

na corrente. E) A elevação da tensão pela bobina ocorre através da

II. A transmissão por corrente alternada é conveniente, transmissão da corrente da bateria para as velas, por

porque a voltagem pode ser facilmente modificada meio de ondas eletromagnéticas. usando-se transformadores.

III. Usando corrente alternada, pode-se realizar a **20.** (Unimar-SP)  
 Uma espira está imersa em um campo

magnético cujo vetor  $B$  é perpendicular à espira. O módulo  
 transmissão por longas distâncias em alta voltagem e  
 de  $B$  varia conforme indica o gráfico a seguir.  
 baixa corrente, minimizando as perdas por efeito Joule.

Está **CORRETO** o que se afirma em

A) I, apenas. D) I e III, apenas.

B) II, apenas. E) II e III, apenas.

C) I e II, apenas.

**18.** (Mackenzie-SP) A figura a seguir representa um O transformador  
 com um primário constituído por  $t'$   $t''$   $t$

$N_1 = 5$  espiras de resistência  $R_1 = 10 \, \Omega$ , alimentado por um O  
 módulo da f.e.m.  $\mathcal{E}$ , induzida na espira por esse campo,

gerador de força eletromotriz constante  $\mathcal{E} = 100 \, \text{V}$ , e um varia de  
 acordo com o gráfico

secundário de  $N = 2$  espiras de resistência  $R = 100 \, \Omega$ . 2 2

No secundário, não passa corrente porque A)  $\mathcal{E}$

$$+ R_0 t_1 t''_0 t'$$

$$\mathcal{E} R_2 - B) \mathcal{E}$$

Núcleo de ferro 0 t

A)  $N_2 < N_1$ .

B)  $R > R_{21}$

C) o núcleo de ferro é fechado. C)  $\varepsilon$

D) as espiras estão enroladas em sentidos contrários.

0 t

E) a corrente que passa no primário é constante. 0 t' t''

**19.** (Unicentro-PR) Nos motores do automóvel, para se produzir a faísca necessária à explosão, é preciso que D)  $\varepsilon$  haja entre os terminais da vela uma tensão de alguns milhares de volts. Essa tensão é obtida através da 0 t elevação da voltagem da bateria, utilizando-se bobinas t' t'' 0 transformadoras de tensão. Sobre a elevação da tensão, é **CORRETO** afirmar: E)  $\varepsilon$

A) Somente há elevação de tensão por bobina

transformadora em circuitos de corrente contínua. 0 t

B) A bobina é um circuito de eletricidade estática e por 0 t' t'' isso atinge voltagens elevadas.

**21.** (PUC-Campinas-SP) Numa usina elétrica, um transformador **24.** (UFMG)

aumenta a tensão gerada de 10 000 V para 300 000 V A) Uma barra condutora é colocada entre os polos de

e assim transporta, com reduzida perda, a energia a dois ímãs, na horizontal, perpendicularmente às linhas

grandes distâncias por linhas de transmissão. Nesse de indução (fig. 1). Se a barra for abandonada e cair,

transformador, o número de espiras do secundário deve qual de suas extremidades apresentará excesso de

ser 30 vezes elétrons? **EXPLIQUE** sua resposta.

A) menor que no primário e a tensão neste é contínua. B

B) menor que no primário e a tensão neste é alternada. N S A C) maior que no primário e a tensão neste é alternada.

Figura 1

D) menor que no primário e a tensão neste é contínua

ou alternada. B) Quando uma espira de fio condutor gira em um campo magnético uniforme, o sentido da corrente

**22.** (UEPG-PR) Sobre um transformador ideal em que o induzida muda duas vezes por rotação (fig. 2).

número de espiras do enrolamento secundário é menor **EXPLIQUE** por quê.

que o do enrolamento primário, assinale o que for B D

**CORRETO.** S A C N

01. A potência elétrica na entrada do enrolamento

primário desse transformador é igual à potência elétrica na saída do enrolamento secundário. Figura 2

02. Se ligarmos os terminais do enrolamento primário a **25.**  
(UERJ) Um supermercado dispõe de um transformador

de energia elétrica que opera com tensão de 8 800 V  
uma bateria de 12 V, teremos uma d.d.p. menor no  
no enrolamento primário e tensões de 120 V e 220 V,  
enrolamento secundário.

respectivamente, nos enrolamentos secundários 1 e 2.

04. A energia no enrolamento primário é igual à energia

no enrolamento secundário, caracterizando o Princípio

## 08. As correntes nos enrolamentos primário e secundário da Conservação da Energia. Secundário 2 220 V Primário FÍSICA 8 800 V

desse transformador são iguais. Secundário 1  
120 V

16. A transferência de potência do enrolamento primário

para o enrolamento secundário não ocorre por

Considere que os valores das tensões sejam eficazes e  
indução. que o transformador seja ideal.

Soma ( ) A) **DETERMINE** a relação entre o número de espiras no

enrolamento primário e no secundário 2.

**23.** B) Sabendo que a potência no enrolamento primário é (UFMG)  
Dois ímãs idênticos, I e II, são soltos

simultaneamente, de uma mesma altura. Nessa queda, de 81 000 W  
e que a corrente no secundário 2 é de

o ímã I cai atravessando um cano de plástico e o ímã II, 150 A,  
**CALCULE** a corrente elétrica no enrolamento

um cano de cobre, como representado nesta figura: secundário 1.

## Ímã I Ímã II SEÇÃO ENEM

**01.** (Enem–2002) Em usinas hidrelétricas, a queda-d'água

Cano de Cano de move turbinas que acionam geradores. Em usinas  
eólicas, plástico cobre

os geradores são acionados por hélices movidas pelo

vento. Na conversão direta solar-elétrica são células

fotovoltaicas que produzem tensão elétrica. Além de

todos produzirem eletricidade, esses processos têm em

Sabe-se que um ímã não atrai objetos de plástico nem de comum o  
fato de

cobre e que o plástico é isolante e o cobre, condutor de A) não  
provocarem impacto ambiental.

eletricidade. Despreze a resistência do ar. Considerando

B) dependerem de condições climáticas.

essas informações, responda:

C) a energia gerada poder ser armazenada.

O tempo que o ímã I leva para atingir o solo é menor, igual

ou maior que o tempo gasto pelo ímã II? D) utilizarem fontes de energia renováveis. **JUSTIFIQUE**

sua resposta. E) dependerem das reservas de combustíveis fósseis.

Editora Bernoulli **97**

## Frente D Módulo 15

**02.** (Enem–2007)

MOCHILA GERADORA O sobe e desce dos quadris

DE ENERGIA faz a mochila gerar eletricidade

Gerador





A mochila tem uma estrutura rígida semelhante à usada por alpinista.

O compartimento de carga é suspenso por molas colocadas na vertical.

Durante a caminhada, os quadris sobem e descem em média cinco centímetros. A energia produzida Molas pelo vai e vem do compartimento de peso faz girar um motor conectado ao gerador de



eletricidade.

Com

de  
ca

ISTOÉ, n. 1 864, set. 2005, p. 69 (Adaptação).

Com o projeto de mochila ilustrado anteriormente, pretende-se aproveitar, na geração de energia elétrica para acionar

dispositivos eletrônicos portáteis, parte da energia desperdiçada no ato de caminhar. As transformações de energia envolvidas

na produção de eletricidade enquanto uma pessoa caminha com essa mochila podem ser assim esquematizadas:

## MOVIMENTO DA MOCHILA

Energia

Energia  
I

potencial

Energia II

As energias I e II, representadas no esquema anterior, podem ser identificadas, respectivamente, como

- A) cinética e elétrica.
- B) térmica e cinética.
- C) térmica e elétrica.
- D) sonora e térmica.
- E) radiante e elétrica.

**03.** (Enem–2010) Há vários tipos de tratamentos de doenças cerebrais que requerem a estimulação de partes do cérebro por

correntes elétricas. Os eletrodos são introduzidos no cérebro para gerar pequenas correntes em áreas específicas. Para se

eliminar a necessidade de introduzir eletrodos no cérebro, uma alternativa é usar bobinas que, colocadas fora da cabeça,

sejam capazes de induzir correntes elétricas no tecido cerebral.

Para que o tratamento de patologias cerebrais com bobinas seja realizado satisfatoriamente, é necessário que

A) haja um grande número de espiras nas bobinas, o que diminui a voltagem induzida.

B) o campo magnético criado pelas bobinas seja constante, de forma a haver indução eletromagnética.

C) se observe que a intensidade das correntes induzidas depende da intensidade da corrente nas bobinas.

D) a corrente nas bobinas seja contínua, para que o campo magnético possa ser de grande intensidade.

E) o campo magnético dirija a corrente elétrica das bobinas para dentro do cérebro do paciente.

# Indução eletromagnética e transformadores

**04.** (Enem–2010) Os dínamos são geradores de energia **05.** (Enem–2009) A eficiência de um processo de conversão

elétrica utilizados em bicicletas para acender uma de energia é definida como a razão entre a produção de

pequena lâmpada. Para isso, é necessário que a parte energia ou trabalho útil e o total de entrada de energia

móvel esteja em contato com o pneu da bicicleta e, no processo. A figura mostra um processo com diversas

quando ela entra em movimento, é gerada energia elétrica etapas. Nesse caso, a eficiência geral será igual ao produto

para acender a lâmpada. Dentro desse gerador, encontra- das eficiências das etapas individuais. A entrada de energia

se um ímã e uma bobina. que não se transforma em trabalho útil é perdida sob

formas não utilizáveis (como resíduos de calor).

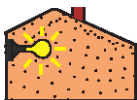


Eficiência

geral = 1,6%



Usina de força Linhas de transmissão Luz



$$E_1 = 0,35 \quad E_2 = 0,90 \quad E_3 = 0,05$$



Eficiência geral da conversão de



energia química em energia luminosa:



$$E_1 \times E_2 \times E_3 = 0,35 \times 0,90 \times 0,05 = 0,016$$



Disponível em: . Aumentar a eficiência dos processos de conversão de



Acesso em: 1 maio. 2010. energia implica economizar recursos e combustíveis.

O princípio de funcionamento desse equipamento é Das propostas seguintes, qual resultará em maior

explicado pelo fato de que a aumento da eficiência geral do processo?

A) Aumentar a quantidade de combustível para queima

A) corrente elétrica no circuito fechado gera um campo

na usina de força.

magnético nessa região.

B) bobina imersa no campo  
magnético em circuito FÍSICA B)  
Utilizar lâmpadas incandescentes, que  
geram pouco

calor e muita luminosidade.

fechado gera uma corrente elétrica.

C) Manter o menor número possível de aparelhos

C) bobina em atrito com o campo magnético no circuito elétricos em funcionamento nas moradias.

fechado gera uma corrente elétrica.

D) Utilizar cabos com menor diâmetro nas linhas de

D) corrente elétrica é gerada pelo circuito fechado por transmissão a fim de economizar o material condutor.

causa da presença do campo magnético. E) Utilizar materiais com melhores propriedades

E) corrente elétrica é gerada em circuito fechado quando condutoras nas linhas de transmissão e lâmpadas

há variação do campo magnético. fluorescentes nas moradias.

**06.** (Enem–1999) A tabela a seguir apresenta alguns exemplos de processos, fenômenos ou objetos em que ocorrem transformações

de energia. Nessa tabela, aparecem as direções de transformações de energia. Por exemplo, o termopar é um dispositivo onde

energia térmica se transforma em energia elétrica.

**De**

**Elétrica Química Mecânica  
Térmica**

**Em**

**Elétrica** Transformador Termopar

Reações

**Química**

endotérmicas

**Mecânica** Dinamite Pêndulo

**Térmica** Fusão

Dentre os processos indicados na tabela, ocorre conservação de energia

A) em todos os processos.

B) somente nos processos que envolvem transformações de energia sem dissipação de calor.

C) somente nos processos que envolvem transformações de energia mecânica.

D) somente nos processos que não envolvem energia química.

E) somente nos processos que não envolvem nem energia química

nem energia térmica.

Editora Bernoulli 99

## Frente D Módulo 15

GABARITO 18. E

19.  
C

Fixação 20. A

01. C 21. C

02. B 22. Soma = 5

03. C 23. O tempo que o ímã I gasta para chegar ao  
solo é menor. Quando a queda acontece dentro

04. D

do cano de cobre, que é condutor, aparecem

05. A) Não, pois a corrente contínua não produz correntes  
parasitas induzidas nesse cano. Dessa

variação do fluxo magnético nas espiras do forma, o  
ímã recebe uma força de frenagem

transformador, e, conseqüentemente, não há



eletromagnética que retarda a sua queda.

tensão induzida no secundário. O mesmo não acontece no cano de plástico, pois

B)  $i_p = 2$  este é isolante.  $= 4,0 \times 10 \text{ A}$

24. A) Pela regra da mão direita, a força magnética

**Propostos** age nos elétrons no sentido de B para A.

Logo, haverá acúmulo de elétrons em A.

01. E

B) Quando a espira ficar com o seu plano

02. C na vertical, o fio AB, por exemplo, estará

iniciando o movimento de descida. De acordo

03. B

com a explicação dada no item anterior,

04. B haverá uma corrente (convencional) de A

para B e, no fio oposto, a corrente será de D

05. B

para C. Depois de meia volta, o fio AB estará

06. C em baixo, iniciando a subida. Logo, a corrente

mudará de sentido.

07. A

08. C 25. A)  $N_1 = 40 \text{ N}_2$

09. D B) 400 A

10. A

## Seção Enem

11. B

01.  
D

12. C

02.  
A

13. B

14. C 03. C

15. D 04. E

16. D 05. E

17. E 06. A